

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

# **Využití aditivních technologií v leteckém průmyslu**

Application of Additive Manufacturing  
Technologies in the Aircraft Industry

Student:

Tomáš Maceček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.

## Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Maceček**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R038 Technologie údržby letecké techniky

Téma: **Využití aditivních technologií v leteckém průmyslu**  
**Application of Additive Manufacturing Technologies in Aircraft Industry**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

**Cíl práce:**

Vytvoření studijního materiálu obsahujícího postup výroby součástí pro letecký průmysl pomocí aditivních technologií.

**Osnova práce:**

1. Úvod.
2. Metody výroby pomocí aditivních technologií.
3. Legislativní požadavky pro aditivní výrobu v rámci EASA.
4. Výroba komponentů pro letecký průmysl pomocí aditivních technologií.
5. Budoucnost využití aditivních technologií v leteckém průmyslu.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

FROES, Francis, BOYER, Rodney.: Additive manufacturing for the aerospace industry. Washington, WA: Elsevier, 2018.

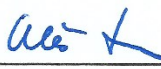
EASA - CAAS Additive Manufacturing.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

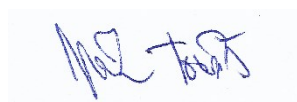
## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Vojtěchu Grafovi, Ph.D. za odborný dohled, trpělivost, cennou kritiku a připomínky, které se vyskytly při psaní mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Petru Štefkovi, MBA, za vstřícnost při rešeršní práci a konzultaci.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....  
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Tomáš Maceček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Libhošť 203, Libhošť

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MACEČEK, T. *Využití aditivních technologií v leteckém průmyslu: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2020, 68 s. Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá využitím aditivních technologií v leteckém průmyslu. V úvodu je uvedena historie a principy aditivní výroby. Na základě srovnání byla zvolena vhodná metoda aditivní výroby součástí a uvedeny příklady součástí letadel vyráběné aditivní technologií. Formou průzkumu byly zjištěny legislativní požadavky evropské agentury pro bezpečnost civilního letectví v EASA pro výrobu součástí aditivními technologiemi v rámci produkčních a údržbových organizací. Výstupem bakalářské práce je ukázka aplikace aditivních technologií a topologické optimalizace na součást interiéru dopravních letadel. A také tvorba studijního materiálu pro aditivní výrobu v leteckém průmyslu.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MACEČEK, T. *Application of additive manufacturing technologies in the aircraft industry: Bachelor Thesis.*

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transportation, 2020, 68 p., Thesis head: Ing. Vojtěch Graf, Ph.D.

Bachelor thesis is aiming to describe the application of additive manufacturing in the aircraft industry. History and function of additive manufacturing was described in the introduction. On the basis of comparison of additive manufacturing methods, a suitable manufacturing method was chosen and examples of parts made by additive manufacturing were mentioned as well. By a form of survey, legislative requirements of EASA in relation to additive manufacturing are referenced regarding production and maintenance organisations. Bachelor's Thesis output is the showcase of additive manufacturing technologies and topology optimization applied to the commercial aircraft's interior as well as the creation of a study material for additive manufacturing in the aircraft industry.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Anglický výraz	Český výraz
3D	3-Dimensional	Trojrozměrné
ABS	Acryl-Butyl-Styren	
AM	Additive Manufacturing	Aditivní výroba
AMC	Acceptable Means of Compliance	Přijatelné způsoby prokazování
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované projektování
CS	Certification Specification	Certifikační požadavky
DED	Direct Energy Deposition	Přímé energetické nanášení
DDM	Direct Digital Manufacturing	Přímá digitální výroba
DLD	Direct Laser Deposition	Přímé laserové nanášení
DLMS	Direct Laser Metal Sintering	Přímé laserové spékání kovu
DOA	Design Organisation Approval	Schválená organizace návrhu
DOD	Drop on Demand	-
EASA	European Aviation Safety Agency	Evropský úřad pro civilní letectví
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing	Aditivní výroba elektronovým paprskem
FAA	Federal Aviation Administration	Federální úřad pro letectví
FDM	Fused Deposition Modeling	
GM	Guidance Manual	Poradenský materiál
LENS	Laser Engineering Net Shaping	Laserové síťové tvarování
MRO	Maintenance Repair Organisation	Organizace údržby letadel
PBF	Powder Bed Fusion	Spékání práškové vrstvy
PC	Polycarbonate	Polykarbonát
PLA	PolyLactic Acid	Polymléčná kyselina
POA	Production Organisation Approval	Schválená organizace výroby
SLM	Selective Laser Melting	Selektivní laserové tavení
SLS	Selective Laser Sintering	Selektivní laserové spékání

## Obsah

Úvod .....	9
1. Metody výroby pomocí aditivních technologií .....	10
1.1. Software pro aditivní výrobu .....	10
1.1.2. Software pro optimalizaci .....	12
1.2. Výroba součástí na bázi kovu .....	14
1.2.1. Binder Jetting (Tryskání pojiva) .....	14
1.2.2. Direct Energy Deposition (Přímé energetické nanášení) .....	15
1.2.3. Powder Bed Fusion (Spékání práškové vrstvy) .....	17
1.3. Výroba součástí na bázi polymerů .....	20
1.3.1. Material extrusion (Vytlačování materiálu) .....	21
1.3.2. Material Jetting (Nanášení trykáním) .....	22
1.3.3. Sheet Lamination (Laminace vrstev) .....	23
1.3.4. Vat-Photopolymerization (Fotopolymerizace) .....	24
2. Legislativní požadavky pro aditivní výrobu v rámci EASA .....	28
2.1. Certifikační požadavky pro aditivní výrobu součástí .....	31
2.2. Certifikace a zachování letové způsobilosti AM součástí .....	36
3. Výroba komponentů pro letecký průmysl pomocí aditivních technologií .....	44
3.1. Výběr a návrh součástí .....	45
3.2. Výroba součástí .....	51
4. Budoucnost aditivních technologií v leteckém průmyslu .....	61
Závěr .....	63
Seznam použité literatury .....	64



# Úvod

Aditivní výroba (Additive manufacturing, nebo také AM), také známá jako 3D tisk, je pojem používaný k popsání technologií, díky kterým jsou komponenty, nebo přidané součásti budovány po vrstvách pomocí digitálních dat bez nutnosti použití nástrojů a přidaných investičních nákladů. Zavedení aditivních technologií přineslo nový rozsah možností výroby součástí s komplexními tvary, které nejsou dosažitelné konvenčními metodami výroby, nebo také možnosti výroby pro starší letadla, kde nástroje potřebné pro výrobu nejsou nadále dostupné. Celkový proces aditivní výroby zahrnuje preprocessing, který se skládá z návrhu součásti a její přípravy na výrobu, dále výrobu samotnou, a nakonec postprocessing zahrnující finální úpravy povrchu, tepelné zpracování a kontrolu součásti.

Způsob výroby aditivními technologiemi se datuje již do 80 let 20. století, kdy Chuck Hull vynalezl metodu SLA – Stereolitografie, která využívá laseru pracujícím v ultrafialovém spektru k vytvrzení fotopolymeru. Technologie 3D tisku využívají strojové příkazy, které jsou získány předem z počítačového softwaru, který požadovaný model rozloží na jednotlivé vrstvy. Za pomoci moderních informačních technologií v kombinaci s aditivní výrobou je možno přeskočit spoustu finančně nákladných kroků, vybavení a potřebných znalostí o práci s kovy. [1]

V posledních letech došlo k velkému nárůstu investic jak do vývoje a produkce 3D tiskáren, tak do jejich provozu. Zavádění součástí vyráběných těmito technologiemi zaručuje, že se tyto technologie budou v budoucnu dále rozvíjet. [2]

Jeden z největších trhů pro AM tvoří letecký průmysl. V souvislosti s rychlým růstem AM je také očekávaný nárůst zájmu firem o podnikání ve výrobě součástí pro letecký průmysl pomocí AM. Tato práce bude sloužit jako přehled toho, co mohou takovéto firmy, případně jednotlivci ochotní v segmentu AM pro letecký průmysl podnikat, očekávat především ze stran úřadů. Poskytne také náhled na aktuální stav aditivních technologií a jejich přehled.

# 1. Metody výroby pomocí aditivních technologií

Aditivní výrobou lze produkovat výrobky o širokém spektru materiálů. V závislosti na požadovaných charakteristikách finální součásti je nejprve nutno zvolit vhodnou metodu výroby a s tím související i použitý materiál.

Terminologií a základními principy aditivní výroby se zabývá norma ISO/ASTM 52900:2015. Tato norma rozděluje aditivní výrobu na procesy popsané v tab. 1.

Zkratka metody	Anglický název	Český název
BJ	Binder Jetting	Tryskání pojiva
DED	Direct Energy Deposition	Přímé energetické nanášení
FDM, FFF	Material Extrusion	Vytlačování materiálu
MJ	Material Jetting	Nanášení tryskáním
PBF	Powder Bed Fusion	Spékání práškové vrstvy
SL	Sheet Lamination	Laminace vrstev
SLA	Vat Photopolymerization	Fotopolymerace

*Tab. 1 - Rozdělení základních metod aditivní výroby.*

Nejčastější volba materiálu v leteckém průmyslu padá na polymery a kovy, přičemž každý druh má své specifické vlastnosti. Tyto vlastnosti pomůže odhadnout software specializovaný na aditivní výrobu a informace od výrobce. Této problematice se budou věnovat následující kapitoly. [3], [4]

## 1.1. Software pro aditivní výrobu

Software je zásadní součástí procesu aditivní výroby. Ve vztahu k aditivní výrobě jej tato práce dělí na software pro přípravu a software pro topologickou optimalizaci.

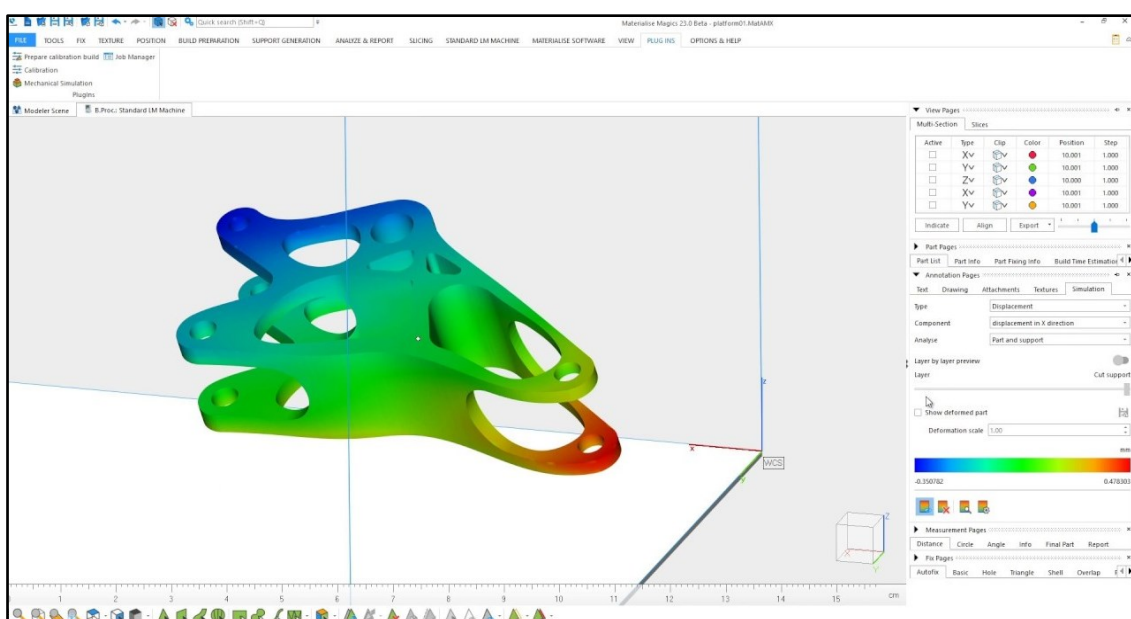
### 1.1.1. Software pro přípravu

Proces aditivní výroby začíná návrhem, který je obvykle proveden v CAD softwaru pro vytvoření digitální podoby součásti. Ve výjimečných případech může proces započít 3D skenováním. Po vytvoření digitálního výkresu součásti musí být tato data přenesena do formy informací, které bude schopna tiskárna rozpoznat.

Výstupem z návrhového softwaru CAD pro proces aditivní výroby je stále nejčastěji soubor s příponou *.stl*, který však v dnešní době začíná být postupně nahrazován novějšími formáty jako *.amf*, nebo *.3mf*, které byly vytvořeny za účelem odstranění jeho nedostatků. Model v tomto formátu je složen z určitého množství trojúhelníků, jejichž počet výrazně ovlivňuje celkovou kvalitu modelu a také výsledné součásti. Hlavní nevýhodou formátu *.stl* je neschopnost uchovat data o použitém materiálu.

V dnešní době existují SW, které se specializují na aditivní výrobu, resp. 3D tisk. Mezi takovýto software můžeme zařadit program společnosti Materialise Magics, který umožňuje úpravy 3D modelů součástí a jejich přípravu pro následnou aditivní výrobu. Tato příprava zahrnuje určení parametrů následného tisku, výslednou orientaci součásti a v závislosti na předchozích nastaveních také návrh podpor výsledných výrobků. [5]

Software od společnosti Materialise je nabízena nejen jako řešení pro zkušené firmy specializované na aditivní výrobu, ale také jako nástroj pro začátečníky v tomto odvětví.



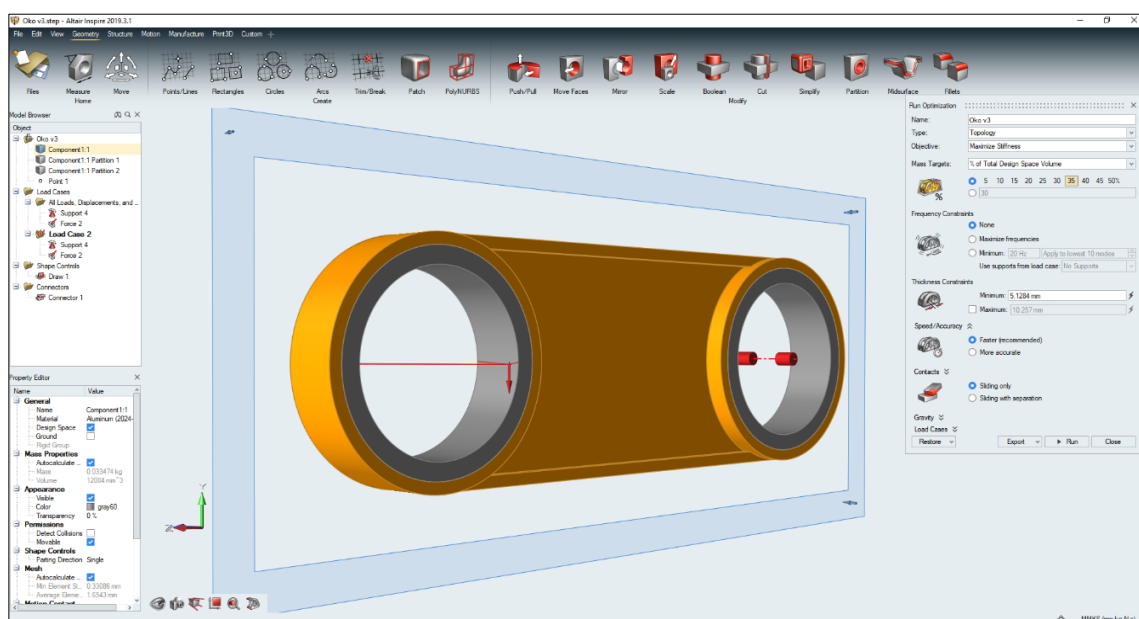
Obr. 1 - Software Materialise Magics - Analýza termo-elastického napětí součásti [22]

Lze v něm vytvářet specifické profily nastavení pro různé druhy materiálů, simulovat zatížení a napětí v součásti během tisku, a také jej používat k přímé komunikaci se zařízením pro aditivní výrobu (3D tiskárnou). Obsahuje speciální algoritmy určené pro ulehčení správného nastavení přístroje pro aditivní výrobu součástí, které jsou aplikovatelné pro metody SLA, SLS a SLM, které jsou blíže popsány v kapitolách č. 1.2. a 1.3.

### 1.1.2. Software pro optimalizaci

V dnešní době existují různé druhy softwaru CAD. Některé jsou však schopné integrace nástrojů pro aditivní výrobu do softwaru CAD. Příkladem takovéto integrace nástrojů aditivní výroby může být software od firmy Autodesk Fusion 360, případně Altair Inspire. Ty jsou schopny topologické optimalizace, pevnostních analýz a zjistit potenciální defekty ještě před samotnou výrobou součásti.

Optimalizační software slouží k minimalizaci váhy a maximalizaci pevnosti součástí. Plné praktické využití je pomocí konvenčních metod výroby limitované právě kvůli složitým tvarům a strukturám, které jsou dosažitelné pouze aditivní výrobou. Tyto metody využívají výpočetních modelů počítajících s předem zadanými počátečními podmínkami. Takto zadané podmínky mohou zahrnovat pevnostní, teplotní a váhové požadavky. Na obr. 2. lze vidět součást s podmínkami nastavenými pro topologickou optimalizaci. Cílem optimalizace bylo zvýšení tuhosti a zároveň redukce hmotnosti součásti na 35% původní.

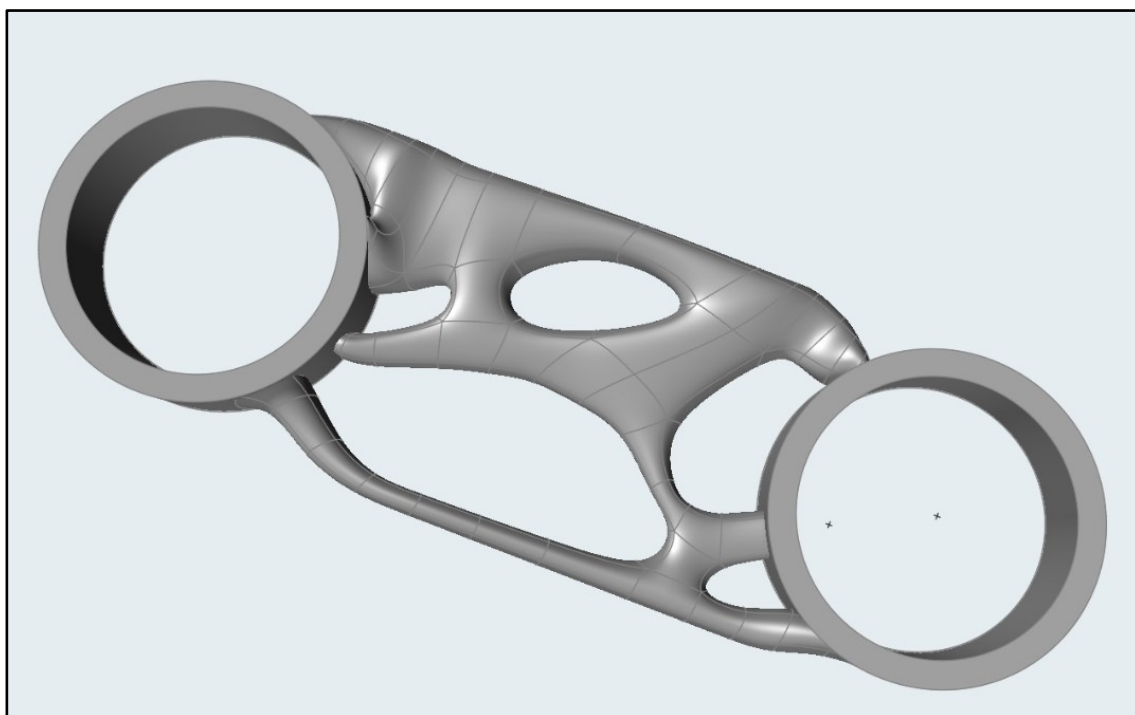


Obr. 2 - Software Altair Inspire - Demonstrace topologické optimalizace



*Obr. 3 – Software Altair Inspire. Součást po provedení topologické optimalizace.*

Součást po provedení topologické optimalizace lze vidět na obr. 3. Tento tvar však ještě není vhodný pro výrobu kvůli přítomnosti ostrých hran, které zvyšují pravděpodobnost vzniku vad. Koncový návrh součásti lze vidět na obr. 4.



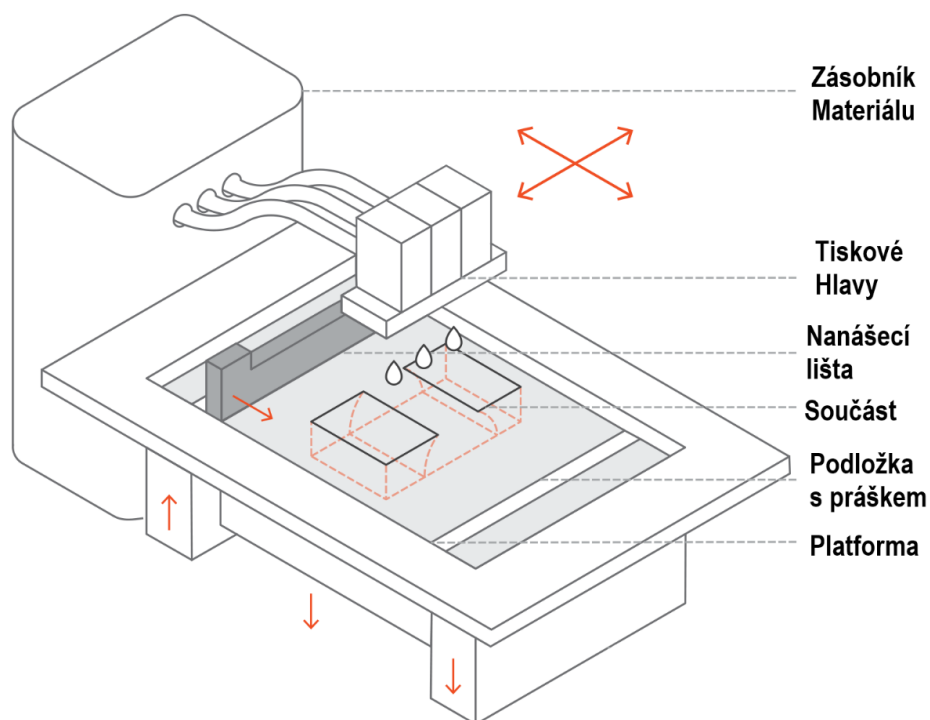
*Obr. 4 – Software Altair Inspire. Finální tvar součásti.*

## 1.2. Výroba součástí na bázi kovu

Z metod zmíněných v začátku kapitoly 2. jsou k výrobě kovů použity metody tryskání pojiva (Binder Jetting), přímé energetické nanášení (Direct Energy Deposition) a spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion) [3, 4]

### 1.2.1. Binder Jetting (Tryskání pojiva)

Jde o metodu výroby, při níž je tekuté pojivo selektivně vstřikováváno na podložku po kapkách o velikosti přibližně 80  $\mu\text{m}$  za pomoci tiskové hlavy. Na tu byla předem nanесena vrstva kovového, keramického, případně polymerového prášku nanášecí lištou. Pojivo slouží k slepení jednotlivých vrstev prášku a po nanášení pojiva je prášek znovu nanесen na podložku, jak lze vidět na obr. 5. Po skončení tisku je součást ponechána v prášku pro vytvrzení a následně tepelně opracována. To je u této metody nutností a také hlavní nevýhodou, jelikož takto vytvořené součásti nejsou vhodné pro vysoké zatížení. Velkou výhodou metody je ovšem tisk za pokojové teploty, čímž se předchází chybám ve výrobě součástí z důvodů teplotních změn. Důsledkem toho má tato metoda jednu z největších tiskových ploch ze všech druhů aditivní výroby – přes 2000 x 1000 x 600 mm.



Obr. 5 - Popis zařízení pracující na základě metod binder jetting. [8]

Tepelné zpracování je provedeno spékáním v peci, což drasticky snižuje pórovitost výrobku. Alternativou ke spékání je pronikání bronzu kapilárním efektem do součásti, která má po předchozím „vypečení“ pojiva pórovitost přibližně 60 %. Oba druhy tepelného post-processingu způsobí smrštění součásti. S tímto smrštěním součásti je nutné počítat už ve stádiu návrhu, jelikož může dosahovat až desítky procent.

Další výhodou je postradatelnost podpor součásti během tisku, jelikož okolní prášek dodá součásti potřebnou podporu. Díky velké tiskové ploše je také možno dosáhnout lepšího vytížení stroje. [11]

### 1.2.2. Direct Energy Deposition (Přímé energetické nanášení)

Jedná se o komplexní metoda aditivní výroby, která je typicky používaná nejen pro opravy, ale také výrobu součástí. DED vytváří 3D objekty tavením materiálu, jenž je ve formě cívky s drátem (obr.6), nebo prášku za pomoci zdroje tepla. Mezi ty se řadí elektrický oblouk, elektronový a plazmový paprsek a laser. Metody DED pracující s materiálem ve formě drátu mohou mít extrémně velkou rychlost výroby za cenu přesnosti, zatímco práškové metody se mohou co do přesnosti téměř rovnat s metodami spékání práškových vrstev (PBF), které jsou popsány v kapitole 2.2.3. [11]

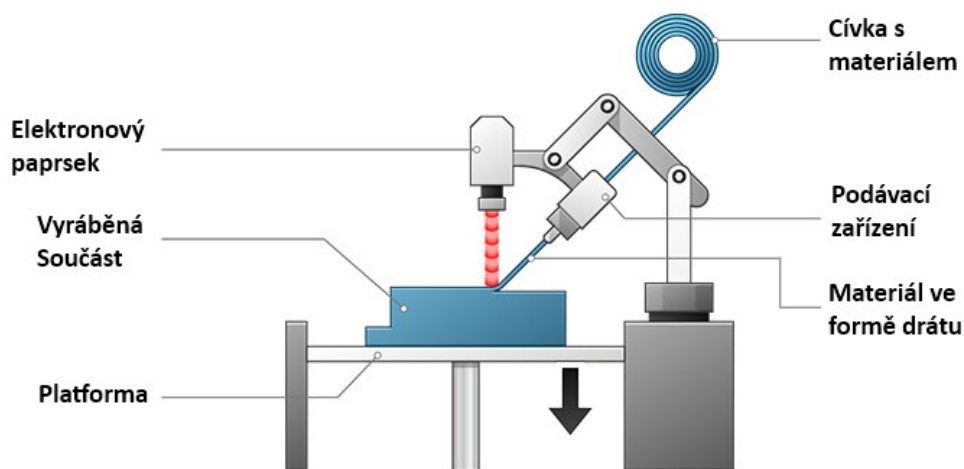
DED můžeme najít pod dalšími názvy jako:

- Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)
- Laser Engineered Net Shaping (LENS)
- Direct Metal Deposition (DMD)
- Rapid Plasma Deposition

Výše uvedené metody se od sebe vzájemně liší pouze použitím jiného zdroje tepla, nebo materiálu. Většina systémů založená na principu metod DED je v porovnání s ostatními AM kovů dražší, ovšem s mnohem rychlejší mírou produkce součástí a zároveň možností pracovat s již existujícími výrobky.

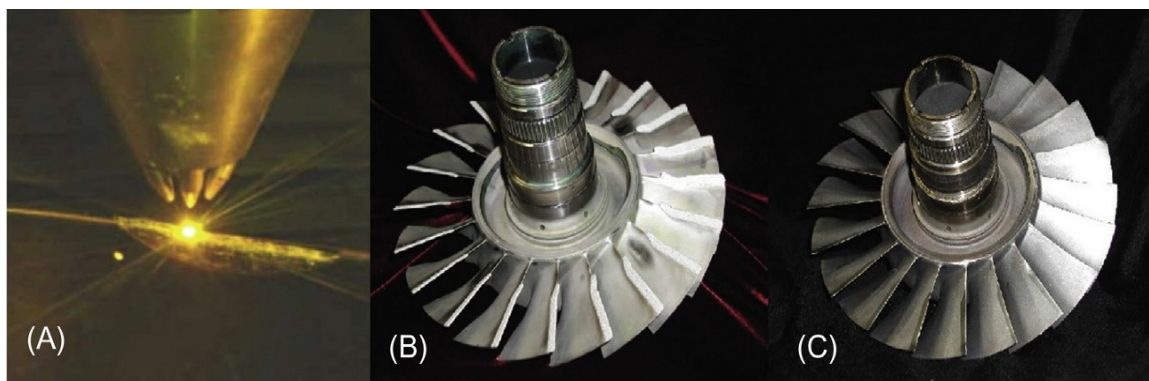
*Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)* je metoda vyvinutá společností Sciaky. Tato technologie dodává do pracovní komory kovový materiál ve formě drátu, který je následně roztaven za pomoci elektronového paprsku a pokládán vrstvu po vrstvě na platformu (Obr. 6). Je schopna rychlé produkce součástí o velkých rozměrech. Mezi touto

technologií nejčastěji používané materiály patří Titan, Tantal a slitiny Inconel a nerezové oceli. [7]



Obr. 6 - Aditivní výroba elektronovým paprskem – metoda EBAM [7]

*Laser Engineered Net Shaping (LENS)* je metoda využívající stlačeného plynu k dodávce práškového materiálu na podložku, kde je poté roztaven pomocí laseru. Typickým příkladem využití této metody v leteckém průmyslu je oprava kompresorových disků vyrobených metodou BLISK, což lze vidět na obr. 7. [9]



Obr. 7 – (A) Oprava profilu lopatky kompresoru za použití metody LENS. (B) Oprava odtokové hrany lopatek kompresoru T700. (C) Kompresor T700 po opravě metodou LENS. [9]

*Direct Metal Deposition (DMD)* je metoda obdobná LENS, ovšem s výjimkou způsobu nanášení prášku. Zde je prášek a ochranný plyn dodáván k trysce samostatně. Je nejčastěji používána pro opravy, modifikace nebo výrobu součástí. [7]

*Rapid Plasma Deposition (RPD)* je technologie vyvinutá firmou Norsk Titanium. Jedná se o metodu patřící do skupiny DED, při níž je použito plazmového paprsku k tavení kovového drátu v argonové atmosféře na pracovní podložku. Přístroje této technologie jsou podle výrobce schopny nejrychlejší výroby titanových součástí na světě a jsou 50 až



100krát rychlejší než práškové metody výroby. Výsledné součásti mají v porovnání s ostatními metodami nízkou porozitu (přibližně 99.5 %). Neopracované výrobky této technologie se podobají svařencům a je u nich nutný dodatečný post-processing, jak lze vidět na obr. 8. [8]



*Obr. 8 - První aditivně vyráběná součást schválená pro provoz leteckým úřadem FAA – Titanová výztuha pro letoun Boeing 787. Vlevo je neopracovaná součást, vpravo je součást po postprocessingu. [8]*

### 1.2.3. Powder Bed Fusion (Spékání práškové vrstvy)

Tyto metody fungují na principu lokálního tavení kovového prášku na pracovní podložce k vytvoření součásti po jednotlivých vrstvách. Zdroj tepla pro tavení prášku je ve formě laserového, nebo elektronového paprsku.

Zařízení fungující na principu PBF se skládají ze stavební komory, filtračního a skladovacího systému pro prášek, elektroniky a laserového, případně elektronového systému. V porovnání s metodou DED, je s metodou PBF možno vytvářet součásti s vnitřními prostory, jako například chladicí kanály, s vysokou přesností.

Tuto metodu lze s malými rozdíly najít také pod těmito názvy:

- Selective Laser Melting – SLM
- Electron Beam Manufacturing – EBM,
- Selective Laser Sintering – SLS,
- Direct Laser Metal Sintering – DLMS.

*Selective Laser Sintering (SLS)* pracuje pouze s polymery a jejich aditivy, proto je zmíněna v kapitole 2.3. [10]

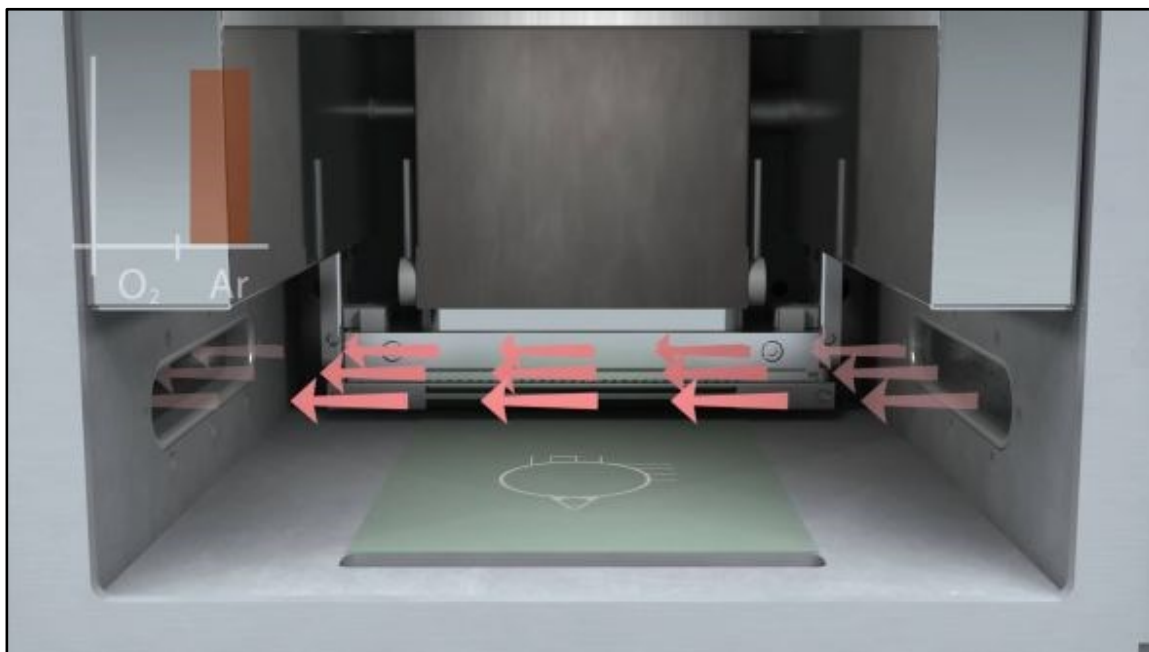
*Selective Laser Melting (SLM)* a *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* jsou prováděny v uzavřené komoře plněné inertním plynem, nejčastěji argonem (Obr. 9) a alternativně dusíkem. Oproti tomu, pracovní komora metody *EBM* pracuje ve vakuu. Důsledkem toho je metoda EBM vhodná také pro výrobu mimo Zemi. [10]



Obr. 9 - Zařízení Arcam EBM Spectra H společnosti GE Additive [12]

*Electron Beam Manufacturing (EBM)* využívá k tavení prášku elektronové dělo o výkonu až 3 kW. Paprsek natavuje každou vrstvu práškového materiálu do požadované geometrie. Proces je v porovnání s ostatními rychlejší a schopen dosahovat vysoké produkce součástí. Díky použití vakuové komory jsou eliminovány nečistoty ve výrobku a díky tomu není potřeba tepelného postprocessingu. Není ovšem schopna dosáhnout tak přesných detailů, jako metoda SLM. Pracuje převážně se slitinami titanu (Ti-6Al-4V), lze však vyrábět také slitiny niklu a oceli. Nevýhodou zařízení fungujících na technologii EBM je jejich, náročnost na údržbu a náchylnost na čistotu kovového prášku. Díky faktu, že patentová práva jsou držena výhradně společností GE Additive je cena za tato zařízení poměrně vysoká. [10]

*Selective Laser Melting (SLM)* využívá laserového paprsku k úplnému roztavení kovového prášku. Ten je přiveden do komory a upraven pomocí optické soustavy složené ze zrcadel a čoček (obr. 10), díky čemuž má výsledný výrobek dobré mechanické vlastnosti. Hotové výrobky lze bez dalších úprav použít jako funkční součást. Laserový paprsek má průměr přibližně 70  $\mu\text{m}$  a tloušťka vrstev se pohybuje mezi 20 – 100  $\mu\text{m}$ . Kovový prášek je po pracovní podložce rozprostřen pomocí lišty, nebo válečku a taven po vrstvách až do finální velikosti. [11], [13], [14]



Obr. 10 - Pracovní komora SLM tiskárny od společnosti Renishaw AM 400. [13]

Pomocí metody SLM lze vyrábět součásti z titanu, hliníku, slitin kobaltu, chromu, platiny nebo také wolframu, což ji dává široké spektrum využití. Je schopna výroby složitých tvarů s vnitřními prostory, které jsou nedosažitelné klasickými metodami výroby při daleko menších materiálových ztrátách. [11], [13], [14]

Stejně jako v případě metody EBM, je cena za takovéto přístroje vysoká. V následujících letech se ovšem očekává jejich snížení z důvodu konkurence na trhu. Nevýhodou aditivní výroby metodou SLM je časová náročnost tisku a v porovnání s ostatními menší velikost tiskové plochy. [14]

*Direct Laser Metal Sintering (DLMS)* je metoda podobná SLS. Nedochází u ní k úplnému roztavení připraveného prášku, nýbrž pouze ke spékání, což omezuje výkon a použití vyrobených součástí. [14]

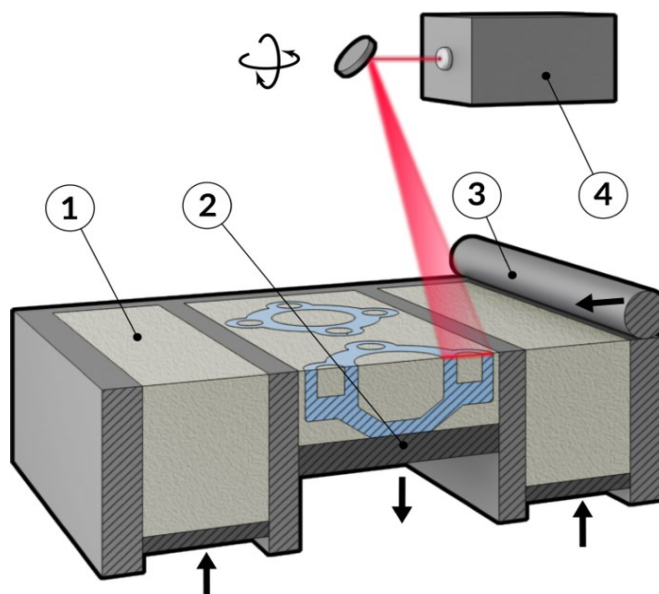
### 1.3. Výroba součástí na bázi polymerů

Primární skupiny technologií aditivní výroby polymerů zahrnují metody:

- Material Extrusion (FDM, FFF),
- Material Jetting (MJ),
- Sheet Lamination (LOM) a
- Vat Photopolymerization (SLA).

Možností využití metod výroby součástí z polymerních materiálů je mnoho, od rychlé výroby prototypů až po funkční, odolné součásti. Výjimku z těchto skupin tvoří metoda SLS, která patří do metod spékání práškových vrstev, která však bude zmíněna v této kapitole. [10]

*Selective Laser Sintering (SLS)* je technologie aditivní výroby fungující na principu spékání práškového materiálu za pomoci laseru. Pracovní komora je nejprve zahřáta těsně pod tavicí teplotu polymeru a je nanесena nová vrstva polymeru. Při doteku laserového paprsku vykonávajícího předem naprogramovanou trasu dojde k překonání teploty tavení v daném místě. Díky tomuto spékání dojde ke spojení částic a výrobek je budován vrstvu po vrstvě. Během procesu výroby je pracovní podložka postupně snižována, zatímco na její povrch je doplňován materiál ze zásobníku, který je poté srovnán válečkem. který lze vidět na obr. 11.



Obr. 11 – Součásti zařízení technologie SLS.

1 - Zásobník na materiál, 2 - pracovní podložka, 3 - Váleček, 4 - Optická soustava s laserem. [15]

Tato metoda, dokáže využít široké spektrum polymerních materiálů a zároveň umožňuje výrobu součástí z kompozitu, čehož dosahuje díky směsí práškového polymeru s jinými částicemi, jako například skelná vlákna. Její použití je zpravidla ekonomicky výhodné pro prototypovou a malosériovou výrobu. [10]

### 1.3.1. Material extrusion (Vytlačování materiálu)

Tato metoda také známá jako *FFF* (Fused Filament Fabrication), nebo *FDM* (Fused Deposition Modeling) je technologie aditivní výroby fungující na principu vytlačování materiálu, který je většinou v podobě struny. V dnešní době jde o nejrozšířenější a nejdostupnější metodu 3D tisku na trhu. Dovoluje vyrábět součásti z odolných termoplastů jako polykarbonát, ABS a širokého spektra kompozitních materiálů. V porovnání s metodou SLS má relativně malou přesnost, ale daleko vyšší produkci součástí. Tisková plocha dosahuje poměrně velkých rozměrů, až 500 dm<sup>3</sup>. [10]



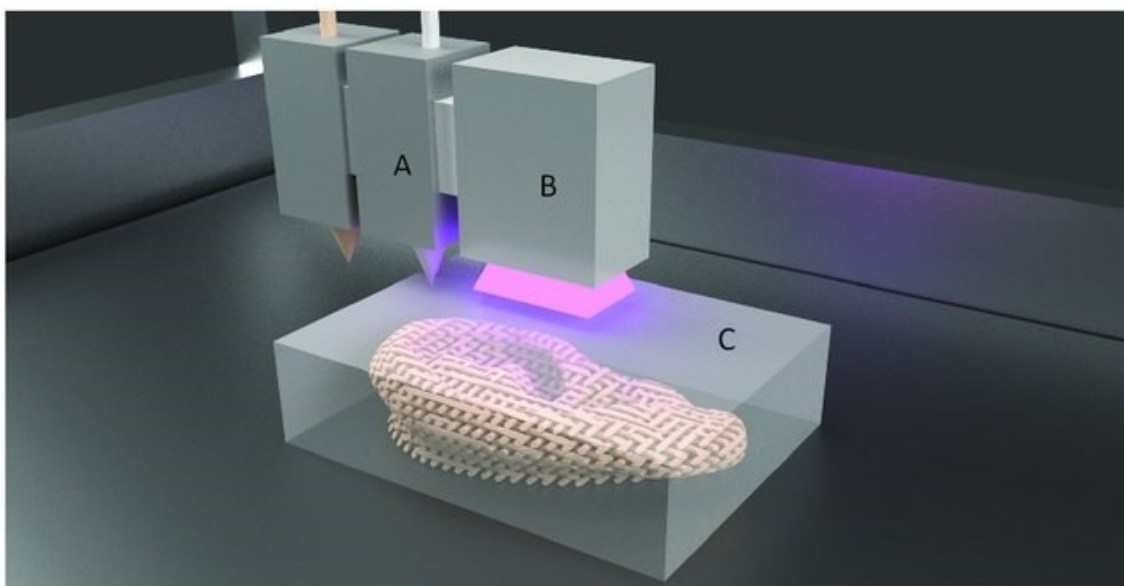
Obr. 12 - Průmyslová linka složená ze zařízení FDM. [16]

V leteckém průmyslu je metoda FDM použita převážně pro výrobu součástí interiérů, nekritických součástí a rychlých prototypů. Způsob aditivní výroby metodou FDM je vhodný pro výrobu prototypů součástí, které nevyžadují přesné rozlišení a povrchovou úpravu, jelikož nevyžaduje náročný postprocessing a je ekonomicky nenáročná. [10]

### 1.3.2. Material Jetting (Nanášení tryskáním)

Tato relativně nová metoda, v anglických publikacích nazývaná také jako PolyJet, využívá technologie inkoustového tisku pro nanášení kapek na pracovní podložku. Vzniklé součásti jsou následně vytvrzeny za pomoci UV záření. Výhodou této metody je velmi dobrá přesnost a povrchová úprava součástí, ale také možnost tisku více materiálů najednou. Nevýhodou je naopak vysoká pořizovací cena a nízká pevnost výsledných součástí. [9]

Využití této technologie v letectví zahrnuje prototypovou výrobu, přímou digitální výrobu a rychlou výrobu nástrojů jako například odlévací formy. [10]



Obr. 13 - Aditivní výroba metodou PolyJet [18]

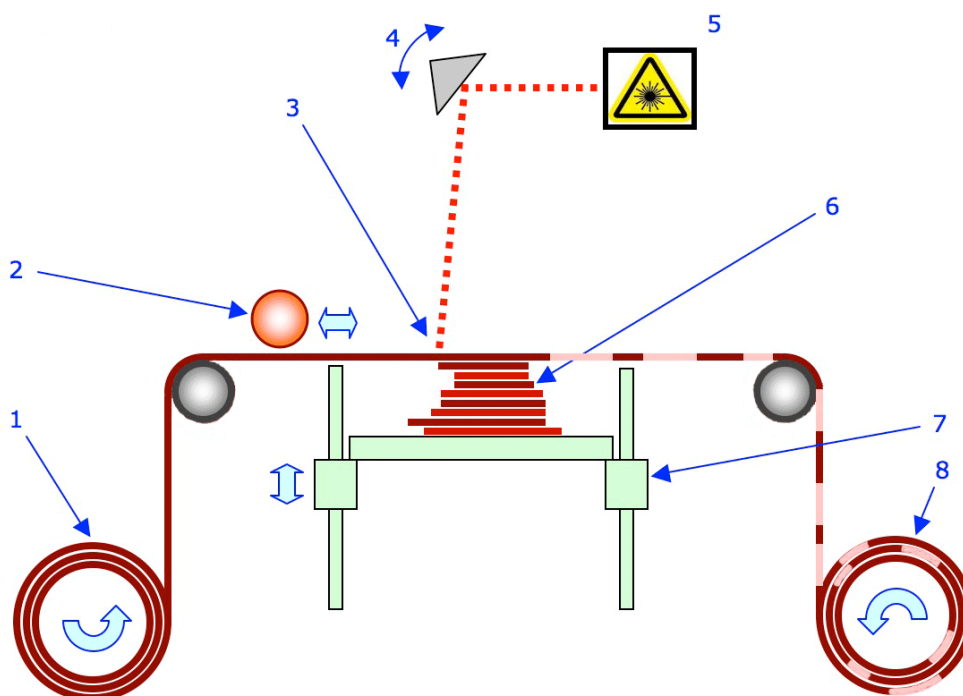
A) Tryska nanášející fotopolymer, B) Zdroj UV záření, C) Materiál

Technologie PolyJet se vyskytuje ve dvou variantách: Drop on Demand (DoD) a Continuous Ink Jetting (CIJ). Varianta DoD nabízí vysokou přesnost součástí za cenu rychlosti výroby, což ji dělá vhodnou pro součásti, jenž vyžadují kvalitní povrchovou úpravu. Naopak varianta CIJ nabízí rychlou produkci za cenu nižší přesnosti součástí. Mezi největší výrobce zařízení PolyJet, resp. metody MJ, patří firmy Stratasys a Materialise. [18]



### 1.3.3. Sheet Lamination (Laminace vrstev)

Proces výroby metodou Sheet Lamination, nebo také Laminated Object Manufacturing (LOM) začíná s první vrstvou pevného materiálu, který je za pomoci válečku rozprostřen na pracovní platformu. V závislosti na druhu procesu laminace mohou být, ale nemusí, vrstvy vzájemně slepeny. Vrstvy jsou většinou slepeny lepidlem, které může být buď nanášeno, nebo integrováno na vrstvách a pro jeho funkci je zapotřebí zahřátí na tavící teplotu. Ke spojení vrstev však také může být použito ultrazvukového svařování. Následně je vrstva vytvarována do požadovaného tvaru pomocí laseru, nebo CNC stroje. Velikost vrstev se může pohybovat už od 0,1 mm. [19],[20]



Obr. 14 - Výroba metodou LOM:

- 1) Zásobárna vrstvy materiálu, 2) Zahřátý váleček, 3) Laserový paprsek, 4) Optický hranol, 5) Laserové zařízení, 6) Vrstvy materiálu, 7) Pohyblivá platforma, 8) Odpadní materiál. [21]

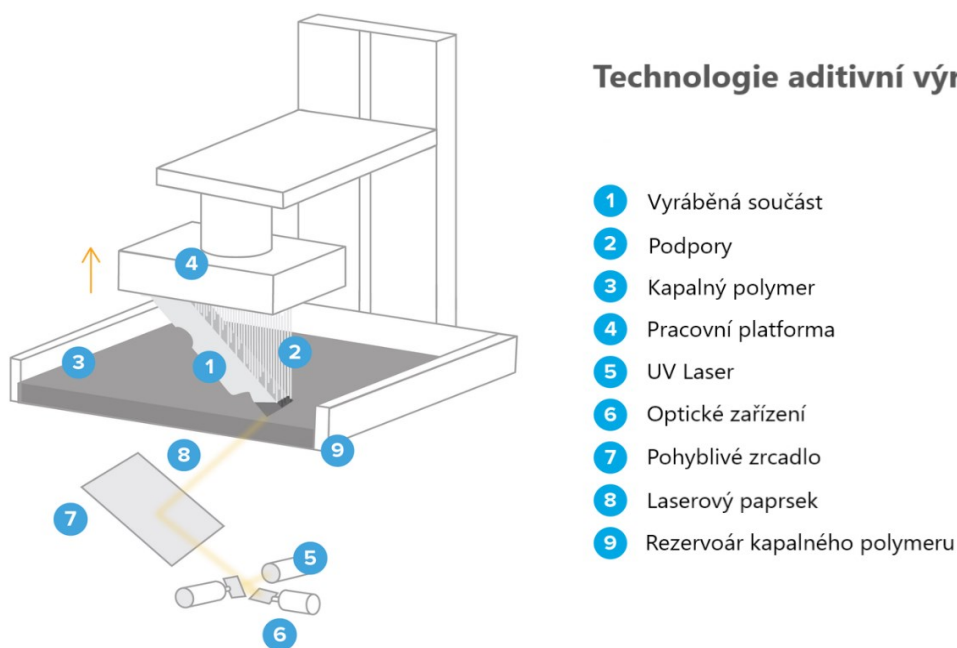
Metoda laminace vrstev dokáže pracovat s vrstvami kovů a také polymerů. Její výhodou je přímá výroba součástí z kompozitních materiálů o v porovnání s ostatními metodami příznivé ceně a větších rozměrů. Hlavní nevýhodou jsou problémy při vytváření komplexních tvarů, malá přesnost součástí a větší množství odpadního materiálu. [19],[20]

#### 1.3.4. Vat-Photopolymerization (Fotopolymerizace)

Jedná se o proces aditivní výroby skrývající se pod komerčními zkratkami:

- Stereolitography (SLA),
- Digital Light Processing (DLP) a
- LCD vat polymerization (LCD)

Výše zmíněné metody využívají zdroje UV záření k vytvrzení kapalného polymeru vrstvu po vrstvě pro vytvoření výsledné součásti. SLA, stejně jako ostatní metody fotopolymerizace, využívá kapalného polymeru citlivého na světlo k vytváření součástí. Zdrojem UV záření je laser, jehož paprsek je vychylován soustavou zrcadel. Výhodou procesu SLA je vysoká přesnost a kvalita výsledných součástí. Nevýhodou je časová náročnost výroby a potenciální toxicita výchozího materiálu. Princip funkce této metody je popsán na obr. 15. [10],[20]



Obr. 15 - Popis funkce zařízení metodou aditivní výroby SLA [24]

*Digital Light Processing (DLP)* je metoda, jenž díky použití projektoru pracujícího se zdrojem UV světla umožňuje vytvrzení celé vrstvy najednou. Tím je schopna zvýšit časovou náročnost výroby oproti SLA, ovšem na úkor výsledné přesnosti.



Posledním a nejnovějším druhem fotopolymerizace je metoda *LCD Vat Polymerization (LCD)*, někdy také nazývána *DUP (Direct UV printing)*. Využívá LCD displeje ke stínění UV záření v určených bodech. LCD displej umožňuje stlačit nejen výslednou cenu, ale také celkové rozměry zařízení na úkor finálního rozlišení součásti. Díky tomu má podobnou rychlost výroby jako metoda DLP, ovšem při menší hmotnosti, velikosti a ceně zařízení. V leteckém průmyslu je metoda fotopolymerizace použita převážně k výrobě detailních prototypů, odlévacích forem a součástí interiéru. [10],[11],[22],[23],[24]

Tabulka č.2 popisuje výhody a nevýhody základních metod aditivní výroby. V tabulce nebyly uvedeny přesné charakteristiky zařízení a finanční částky, jelikož se jedná o značně proměnlivé údaje.

Metoda výroby	Průmyslové označení	Výhody	Nevýhody
<b>Binder Jetting (Tryskání pojiva)</b>	BJ	Široké spektrum využití a kombinace materiálů; Není nutné vytvářet podpory pro součásti; Velká tisková plocha a výroba za pokojových teplot.	Slabé mechanické vlastnosti výsledných součástí a jejich pórovitost; Nutnost postprocessingu, který může výrazně ovlivnit celkový čas výroby.
<b>Direct Energy Deposition (Přímé energetické nanášení)</b>	EBAM, DED, DLD, DMD, LENS	Možnost nejen výroby, ale také oprav součástí; Dobré mechanické vlastnosti výsledných výrobků; Možnost volby mezi přesnější, nebo rychlejší výrobou.	Finanční náročnost; Může být vyžadován postprocessing pro odstranění „schodišťového“ efektu;
<b>Powder Bed Fusion (Spékání práškové vrstvy)</b>	SLM, EBM, DLMS, SHS, SLS	Výroba součástí z kovů, polymerních a keramických materiálů; Dobrá přesnost výrobků a mechanické vlastnosti. Výrobky nepotřebují podpory	Limitovaná velikost výsledných součástí; Finanční náročnost; Časová náročnost (SLM)

Metoda výroby	Průmyslové označení	Výhody	Nevýhody
<b>Material Extrusion (Vytlačování materiálu)</b>	FDM, FFF, ME	Finanční a technická nenáročnost; Široká nabídka zařízení a druhů materiálů na trhu; Schopnost výroby součástí z kompozitních materiálů a různých druhů aditiv. ; Velká tisková plocha.	Přesnost a rychlost zařízení je limitovaná průměrem trysky;
<b>Material Jetting (Nanášení tryskáním)</b>	Polyjet, DoD, CIJ, MJ	Výroba z více materiálů/barev; Dobrá přesnost a povrchová úprava výrobku;	Vysoká cena za materiál a celé zařízení; Součásti mají slabé mechanické vlastnosti
<b>Sheet Lamination (Laminace vrstev)</b>	LOM	Výroba funkčních kompozitních součástí o velkých rozměrech; Příznivá cena;	Problémy při vytváření komplexních tvarů; Velké ztráty na materiálu během výroby.
<b>Vat Photopolymerization (Fotopolymerizace)</b>	SLA, DLP, LCD-SLA	Dobrá přesnost a kvalita povrchu součásti; Široká nabídka fotopolymerů pro specifické použití.	Nutnost tvorby podpor; Nezbytný postprocessing a následné vytvrzení součástí.

Tab. 2 - Srovnání metod aditivní výroby

Díky srovnání vlastností jednotlivých metod AM a využití dat analyzovaných ve studii lze určit vhodnou metodu výroby pro různé skupiny kategorie součástí. [26] Díky tomu lze vytvořit obecný přehled vhodných metod výroby leteckých součástí, jak lze vidět v tab. 3.

Součást	Materiál	Původní metoda výroby	Technologie AM	Hmotnost původní součásti (kg)	Hmotnost součásti AM (kg)	Snížení hmotnosti
Podpěra	Slitina Ti	Obrábění	EBM	1,09	0,38	65 %
Spona bezpečnostního pásu	Slitina Al	Kování a obrábění	SLM	0,16	0,07	55 %
Závěs krytu motoru	Slitina Ti	Odlévání a obrábění	DLMS	0,92	0,23	65 %
Vidlice kování	Slitina Al	Odlévání a obrábění	SLM	0,8	0,4	50 %

Tab. 3 – Příklady vhodných metod AM pro výrobu součástí. Poměr snížení hmotnosti byl vypočítán jako  $[(\text{Hmotnost původní součásti} - \text{Součást AM}) / \text{Hmotnost původní součásti}]$ . [26]

## 2. Legislativní požadavky pro aditivní výrobu v rámci EASA

Certifikační proces finálních součástí a výrobků představuje jednu z největších výzev pro výrobce součástí aditivními technologiemi v leteckém průmyslu. Důvodem jsou vlastnosti samotné aditivní výroby jako např. anizotropie (kde v odlišných směrech má materiál rozdílné charakteristiky) a porozita, ale také technologie samotné v porovnání s konvenčními technologiemi. Jedná se totiž o mnohem mladší a méně prozkoumanou technologii. Díky kombinaci těchto faktorů a složitější predikci finálních vlastností byly požadavky na certifikaci součástí vyráběných aditivními technologiemi zvýšeny. [27]

V Evropě jsou požadavky na produkci a návrh součástí pro letecký průmysl vydávány evropským úřadem pro bezpečnost civilního letectví (EASA) jako certifikační požadavky (CS) a ve Spojených státech amerických pak Federálním leteckým úřadem FAA jako požadavky FAR. Obecně bývají tyto požadavky shodné, nebo alespoň částečně podobné, a to jak obsahem, tak také řazením, jako např. certifikační specifikace pro malá letadla CS-23 a FAR-23.

Existují termíny používané úřady a průmyslem k posouzení kvality vyrobených a sestavených součástí a sestav jako např. způsobilost, certifikace, ověření a osvědčení. V této práci jsou používány převážně pojmy způsobilost a certifikace a mají zde následující význam:

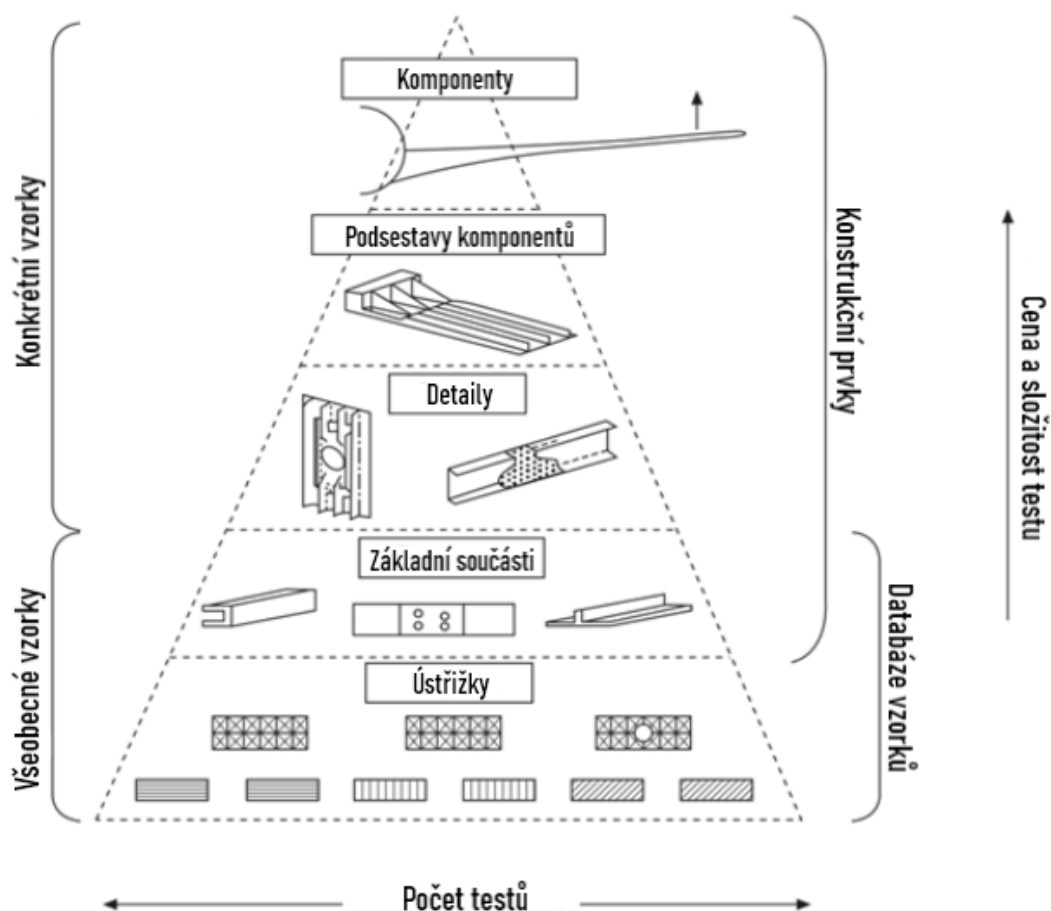
- Způsobilost – dokazuje, že součást, nebo proces splňuje zadané požadavky
- Certifikace – proces, kterým žadatel prokáže, že součást, služba nebo proces odpovídá specifickým požadavkům.

Všechny součásti a produkty používané v leteckém průmyslu v rámci Evropské Unie musí splňovat příslušné certifikační požadavky a minimální standardy ETSO (European Technical Standard Order) bez ohledu na materiál a kombinaci procesu používaného k dosažení vlastností materiálu. Tím může být např. pevnost a hořlavost. Nezávisle na zařízení, nebo společnosti, kde se součásti vyrábějí, by měl žadatel o certifikaci prokázat způsobilost materiálu pro zamýšlené použití k výrobě součástí a to testem, nebo prokazatelnými zkušenostmi s jeho použitím. [28]

Žadatel také musí prokázat, že:

- vlastnosti návrhu AM jsou založeny na statisticky důležitých údajích v závislosti na daném předpisu CS a požadavku, že dostatečně reprezentují všechny produkční parametry a rozdíly, resp. odchylky mezi výrobními technologiemi a zařízeními použitými k výrobě součástí v rámci výrobního zázemí,
- hodnoty získané během testů součástí přesně odrážejí mechanické vlastnosti finálního výrobku určeného k produkci,
- provádí evidenci o revizních kontrolách materiálů a procesů použitých při výrobě.

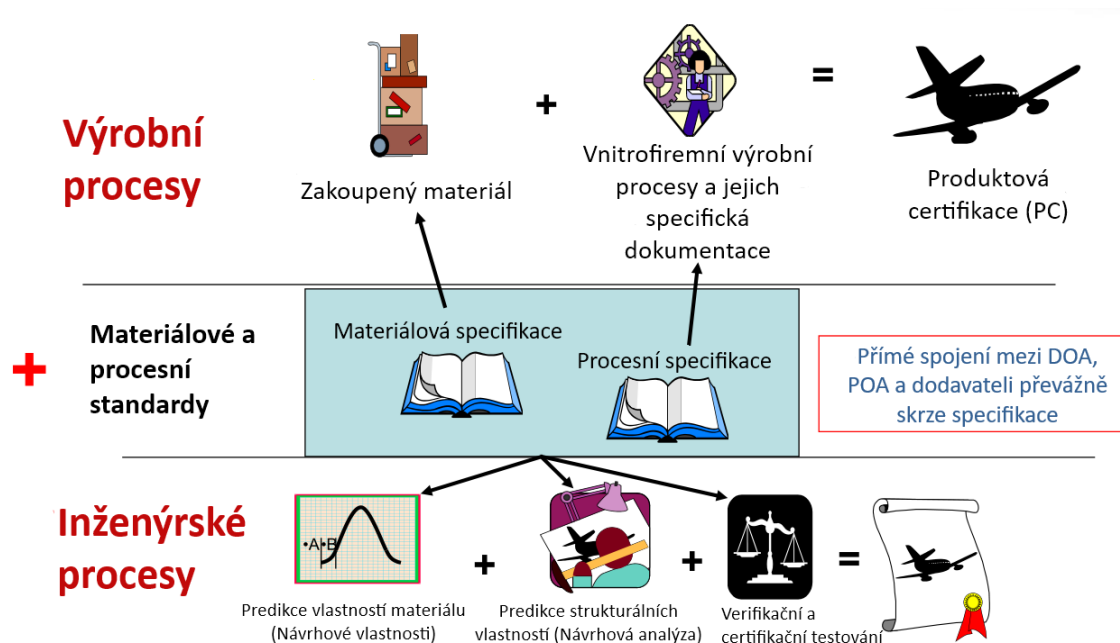
V případě součástí o složitých tvarech a náročných výrobních procesech je vyžadováno sestavení testové pyramidy a únavových testů (tzv. coupon testing), které skutečně prokážou technické vlastnosti součástí. Testovací pyramida, kterou lze vidět na obr. 16, slouží k plánování a tvorbě testů. Vodorovná osa značí počet testů, kdežto svislá jejich složitost a cenu. Postupováním výše v pyramidě by testů mělo ubývat z důvodu nárůstu složitosti. [28][29]



Obr. 16 - Testovací pyramida pro certifikaci materiálů v leteckém průmyslu. [29]

V souvislosti s parametry výroby jsou skutečné parametry součástí ovlivněny několika faktory. Ty zahrnují orientaci součástí a podpůrného materiálu během procesu aditivní výroby a také jejich vnitřních prostor, které nejsou dostupné pro případ postprocessingu. V tomto důsledku se mohou technické vlastnosti výrobků vzájemně lišit a nastat problémy s anizotropií. [28]

Na obr. 17 je popsán proces certifikace součástí pro aditivní výrobu. Ten je také totožný s certifikací kompozitních součástí. Proces certifikace se sestává z výrobních a inženýrských procesů, které jsou vzájemně provázány specifikacemi a standardy.



Obr. 17 - Proces certifikace součásti [32]

Dle certifikačního memoranda EASA CM-S-008 by se pro certifikaci aditivní výroby komponentů malých a velkých letadel měla zaměřovat pozornost především na tyto předpisy:

- CS-23, CS-25 a jejich části:
  - 571. – Fatigue and damage tolerance
  - 603. – Materials
  - 605. – Fabrication methods
  - 613. – Material strength properties & material design values
  - 853. – Compartment interiors

- CS-E:
  - 70. – Materials and manufacturing methods
  - 100. – Strength
- CS-P:
  - 170. – Materials and manufacturing methods
  - 240. – Strength
- CS-APU 60. – Materials
- Part 21:
  - A.20 – Compliance with the type certification basis, operational suitability data certification basis and environmental protection requirements
  - A.31 – Type design
  - A.101 – Designation of applicable certification and specification
  - A.131 – Scope – Applicable design data
  - A.133 – Eligibility
  - A.147 – Changes to the approved production organisation
  - A.247 – Change in design assurance system
  - A.433 – Repair design
  - A.447 – Record keeping
- GM 21:
  - A.91 – Classifications of changes to the type design
  - A.435 (a) – Classification of repairs
  - A.437 – Issue of repair design approval
- AMC 145.A.42(c) – Acceptance of components

Tato kapitola se nebude plně věnovat obecné certifikaci součástí pro letecký průmysl, ale zaměří se na specifika aditivní výroby a zejména výše uvedené předpisy.

## **2.1. Certifikační požadavky pro aditivní výrobu součástí**

Certifikační požadavky (Certification specifications) jsou základem úspěšné certifikace součástí pro letecký průmysl. Tyto požadavky jsou označeny zkratkou CS a řadí se do kategorií, jako např. pro malá a velká letadla (CS-23 a CS-25), motory (CS-E), pomocné energetické jednotky (CS-APU) a vrtule (CS-P). Níže budou rozebrány certifikační

požadavky, na které by se měla v rámci aditivní výroby součástí pro velká letadla zaměřit pozornost.

#### CS 25.571

Pro kritické součásti (také nazývány jako Class 1) je dle předpisu CS 25.571 nutné prokázat testováním charakteristik součásti, a procesu výroby, že u výsledného výrobku v průběhu provozního života letadla nedojde ke katastrofálnímu selhání v důsledku únavy, stárnutí, koroze, nebo výrobních vad. [30]

Jako kritickou součást lze nazvat kteroukoliv součást, která může způsobit:

- Ztrátu tahu a kontroly nad letounem,
- Nezvyklou činnost, nebo neschopnost ovládat systémy, které jsou nutné pro bezpečnost letu,
- Zneschopňující zranění, nebo smrt posádky,
- Nepřípustné problémy s údržbou a opravami.

Existují další dva druhy klasifikace součástí – Class 2 a Class 3. Součásti zahrnuté v Class 2 jsou součásti, které sice přenášejí zatížení, ale jejich účel není natolik kritický jako Class 1. Součásti patřící do kategorie Class 3 jsou považovány za málo zatížené, nebo nezatížené součásti.

Kvůli možným důsledkům selhání je nutné, aby součásti taktéž prokázaly schopnost tolerance vůči poškození, tedy že součást s těmito požadavky je schopna:

- Tolerance vážného poškození v důsledku únavy a stárnutí bez zhoršení provozuschopnosti letounu,
- Vydržet poškození po takovou dobu, aby bylo zachyceno a opraveno během pravidelných i nepravidelných údržbových úkonech.

Tyto podmínky se týkají pouze dílů, nebo systémů jako křídlo, trup, ovládací plochy, směrové, výškové kormidlo a jejich systémy, závěsy motoru, přistávací zařízení a jejich primární komponenty a další součásti, jejichž selhání by mohlo ohrozit provozuschopnost letounu.[28]

Na základě testů je tedy nutné vytvořit kontrolní intervaly a určit dobu životnosti do výměny součásti (CS 25.571(b) a (c)) a součást navrhnout už dopředu tak, aby se minimalizovala nutnost zvláštních inspekcí pro posouzení stavu součásti a zachycení



případných vad. Bod 571 požadavku CS 25 se týká AM z důvodu anizotropních a těžko předvídatelných vlastností takto vyráběných součástí.

#### CS 25.603

Ohledně výběru materiálu hovoří bod 603, který klade důraz na vhodnou volbu materiálu z hlediska jeho vlastností a použití v souvislosti s bezpečností a její prokázání na základě zkušeností, nebo testů. [30]

#### CS 25.605

O konstantních vlastnostech výrobních metod hovoří bod 605 požadavku CS 25. Zde je řečeno, že metody výroby, které vyžadují přesnou kontrolu pro dosažení požadovaných vlastností musí být schváleny v rámci procesních standardů. V souvislosti s AM jde podle požadavků CS-ETSO a AMC CS 25 nejčastěji normy ATSM (American Society for Testing and Materials) a ISO (International Organization for Standardization). [30][31]

#### CS 25.613

Tento bod řeší zavedení reálných podmínek a faktorů, jako např. vlhkost a teplota do testování důležitých součástí, nebo struktur. Vlastnosti požadované pro kovové materiály a použité statistické metody dále definuje standardizační návod MMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization) od společnosti SAE International. [30]

#### CS 25.619

Předpis CS 25.619 definuje požadavky, za kterých je nutno aplikovat nejvyšší stupeň kontrol a násobek (faktor) bezpečnosti. Tento násobek se liší v závislosti na použití a důležitosti součástí. Definuje jej pro každou část struktury, jejíž pevnost je nejistá, s rozdíly v důsledku výrobního procesu nebo inspekčních metod. Pro aditivní výrobu to znamená použití nejvyššího relevantního faktoru (násobku) bezpečnosti v závislosti na prokázaných vlastnostech, nebo kontrolách.

Příkladem navýšení kontroly součástí může být dle CS 25.621:

- 100% inspekce povrchu každé součásti za použití povrchových NDT metod,
- Inspekce důležitých vnitřních prostor s podezřením na vývoj únavových trhlin a defektů každé součásti radiografickou, nebo ekvivalentní inspekční metodou

Pro součásti použité v interiéru letadla jako stropní panely, přepážky, kabinky, podlahy a materiály použité v jejich konstrukci platí, že musí mít schopnost sebe-zhašení. Průměrná délka jejich hoření nesmí přesáhnout 6 palců délky (152 mm) a průměrný čas zhašení po odebrání zdroje tepla by neměl přesáhnout 15 sekund. Hořící kusy takovýchto součástí by po oddělení neměly pokračovat v hoření po dobu větší než 3 sekundy.

Pro podlahové krytiny, textilie, součásti sedaček, dekorativních součástí interiéru, potrubí klimatizace a vedení vzduchu by průměrná vzdálenost hoření neměla přesáhnout 8 palců (203 mm). Malé součásti, které jsou považovány za nedůležité pro podporu hoření a elektrickou izolaci by neměly přesáhnout vzdálenost hoření nad 4 palce (101,6 mm). Mezi polymerní materiály, které splňují protipožární opatření a jsou již využívány pro výrobu součástí interiéru patří například nylon se skelnými vlákny, nebo varianta nazývaná Nylon 12. [30]



*Obr. 18 - Vzduchové potrubí vyrobené z materiálu Nylon 12 metodou SLS společností EOS. [35]*

### CS-E

Pro motorové jednotky platí zvláštní předpis – CS E, který určuje podmínky, které musí uchazeč o certifikaci součásti, nebo systému splnit. V tomto předpisu se pozornost zaměřuje především na body 70 a 100 v kontextu s AM. Řeší využití materiálu o vhodné pevnosti a výdrži pro daný účel a jehož funkce a spolehlivost by měla být prokázána zkušenostmi, nebo testy. Ty by měly být provedeny po kterémkoliv tepelném postprocessingu, nebo ve vhodné fázi. Kterákoliv následná změna v procesu výroby nesmí být provedena bez souhlasu výrobce motoru a takovéto schválení by mělo zahrnovat dokument zahrnující potřebu pro opakování specifických testů, nebo revizi kontroly kvality.

Bod 100 navíc zmiňuje důležitost správné konstrukce motoru v souvislosti se všemi režimy navržené letové obálky. [33]

### CS-P

Pro vrtule a vrtulové jednotky platí požadavky CS-P. V souvislosti s AM by se měla zaměřovat pozornost především na body 170 – Materials and Manufacturing Methods a 240 – Strength. V obecném pohledu hovoří o požadavcích na materiál a výsledné součásti v podobném smyslu, jako předpis CS-E, tedy:

- Volby vhodného materiálu s ohledem na jeho charakteristiky v souvislosti s pevností, ochrany proti stárnutí a korozi,
- Prokázání těchto vlastností na základě testů, nebo zkušeností,
- Identifikací materiálů a součástí,
- Segmentace součástí podle stupně „kritičnosti“,
- Testování a provádění zkušebních napětí (na 0,2% meze kluzu). [34]

### CS-APU

Pomocné energetické jednotky mají požadavky na podobné bázi, jako pohonné jednotky a zaobírá se jimi předpis CS-APU. V souvislosti s aditivní výrobou by se pozornost měla zaměřit na bod 60 – Materials, který hovoří o prokázání způsobilosti v závislosti na materiálu na základě testů, případně zkušeností. [36]

## 2.2. Certifikace a zachování letové způsobilosti AM součástí

Důležitým předpisem ve vztahu k AM v leteckém průmyslu je Part 21. Ten pojednává o návrhu, certifikaci, výrobě součástí a systémů pro letecký průmysl, požadavcích pro výrobce a konstrukční kanceláře. V případě, že se výrobce součástí pro letecký průmysl rozhodne pro využití aditivních technologií, tak jedním ze základních bodů procesu certifikace bude tvořit článek A.20.

### Part 21.A.20

Pojednává o prokazování shody s typovou certifikací, dat o prokázání provozuschopnosti (obsahují např. hlavní seznam minimálního vybavení – MMEL, požadavky na simulátory, atd.) a požadavky na ochranu přírodního prostředí. V souvislosti s typovou certifikací hovoří o potřebě nové typové certifikace za podmínky důležitých změn v konstrukci, za což je považována také AM z důvodu jejich vlastností. [36]

V případě každého neočekávaného problému, nebo události během procesu prokázání shody, který by byl v rozporu s předchozími odhady a závěry (pozn.: např. pevnostní a materiálové analýzy, nebo jiné skutečnosti, které odporují kritériím certifikačního procesu) je žadatel povinen tyto skutečnosti nahlásit na EASA. [37]

Dokumentace k prokázání shody s certifikačními požadavky obvykle obsahuje:

- Inspekční plány a hlášení,
- Výkresy a návrhová data,
- Výpočty a analýzy,
- Specifikace.

Tyto dokumenty by měly být zároveň vzájemně svázány s body, které odpovídají specifickým certifikačním požadavkům. Je důležité, aby žadatel také dodal zdůvodnění získaných dat a prohlášení o pravosti spolu s podpisem oprávněné osoby. [37]

### Part 21.A.31

Dle bodu A.31 je nutno v souvislosti s aditivní výrobou brát na zřetel také návrh konstrukce. Ten by měl obsahovat relevantní data umožňující prokázání

provozní schopnosti, dále výkresy a specifikace spolu se seznamem těch, jenž jsou nezbytné k prokázání funkcí navrhovaného produktu ve vztahu k procesu typové certifikace.

#### Part 21.A.101.

Změnami v již využívaných součástech a jejich certifikací se zabývá článek A.101. Tyto změny jsou řazeny do těchto kategorií:

- Podstatné – Úprava umístění motorů, nebo jejich počtu;
- Výrazné – Redukce palubní posádky, konverze letounu z osobní na nákladní přepravu;
- Nevýznamné – Instalace autopilota, prodloužení provozní životnosti draku letadla.[37]

Seznam veškerých změn ve výše zmíněných kategoriích lze nalézt v předpisu Part 21.A.101. Na obr.19 lze vidět vzor žádosti o změnu typového návrhu. Návrh je rozdělen do 8 kroků, ve kterých má žadatel šanci prokázat nárok na její schválení. [37]

Součástí rozhodovacího procesu je také praktičnost změny. V případě, že změna struktury, nebo materiálu má velmi malý dopad na bezpečnost, ale je mnohem náročnější a nákladnější na výrobu je změna shledána jako nepraktická. Proto je kladen důraz na zhodnocení praktičnosti změn ještě před podáním žádosti. Tento bod může být výhodný pro AM v případě, že původní součást je složitější a náročnější na výrobu. [37]

CHANGED PRODUCT RULE (CPR) DECISION RECORD		
TC/STC No: Click here to enter text.	Project Number: Click here to enter text.	
Step 1: Identify the proposed type design changes to the aeronautical product. (See paragraph 3.2 of GM 21.A.101)	The proposed type design changes are identified here or in the following document(s): Click here to enter text.	
<b>Note:</b> The CRI process is used to track/document the decisions at Step 2 and Steps 5 through 8 as required.		
Step 2: Is the proposed type design change substantial? (See paragraph 3.3 of GM 21.A.101)	<input type="checkbox"/> Yes          <input type="checkbox"/> No	<b>New Type Certificate:</b> Proceed to point 21.A.19. Point 21.A.101 does not apply. A Certification Review Item CRI A-01 will be used to establish and document the certification basis.  <b>Proceed to Step 3.</b>
Step 3: Will you use the latest standards? (See paragraph 3.4 of GM 21.A.101)	<input type="checkbox"/> Yes          <input type="checkbox"/> No	<b>Latest Standards:</b> Propose a certification basis using the CSs in effect at the date of application. Proceed to Step 8.  <b>Proceed to Step 4.</b>
Step 4: Arrange changes into related and unrelated groups. (See paragraph 3.5 of GM 21.A.101)	<b>Note:</b> For multiple groupings, continuation of this process should be split into separate decision records. Groupings may be rationalised and recorded in separate documents: Click here to enter text.	
Step 5: Is each related or unrelated group a significant change? (See paragraph 3.6 of GM 21.A.101)	<input type="checkbox"/> Yes          <input type="checkbox"/> No	<b>Proceed to Step 6.</b>  <b>Earlier Standards:</b> Propose a certification basis using the CSs in effect before the date of application but not earlier than the existing certification basis. Certification basis to be defined and documented as indicated (below).  <b>Proceed to Step 8.</b>
Step 6: Prepare your Certification Basis List. (See paragraph 3.9 of GM 21.A.101) <b>Affected Areas:</b>	The Affected Area(s) is (are) detailed here or in the following Certification Basis List document number(s): Click here to enter text.  Process and propose each applicable certification specification individually. <b>Proceed to Step 7.</b>	
<b>Not Affected Areas:</b>	Existing Standards: You may continue using the existing certification basis.	
Step 7: Do the latest standards contribute materially to the level of safety and are they practical? (See paragraph 3.10 of GM 21.A.101)	<input type="checkbox"/> Yes          <input type="checkbox"/> No	<b>Latest Standards:</b> Propose a certification basis using the CSs in effect on the date of application.  <b>Earlier Standards:</b> You may propose a certification basis using the CSs in effect before the date of application but not earlier than the existing certification basis. Certification basis defined or documented as indicated below.
<input type="checkbox"/> Continuation Sheet(s) Attached	<b>Note:</b> Several CSs may apply to each affected area, and the assessment may differ from specifications to specifications. Indicate 'Yes' if compliance with any latest standard(s) is required. Indicate 'No' only if earlier standard(s) is (are) proposed.	
<b>Note:</b>	You may submit a proposal for the decision in Step 7; however, EASA will make the final certification basis determination.	
Step 8: Ensure the proposed certification basis is adequate. (See paragraph 3.11 of GM 21.A.101)	If you deem that the certification basis is adequate, submit the proposed certification basis to EASA. If not, consult EASA. CRI A-01 may be needed to document the certification basis.	
<b>Certification Basis:</b>	The certification basis is detailed here or in the following document(s): Click here to enter text.	
Based on the information provided above, I am proposing the certification basis with the following classification for the type design change. (check one)		
<input type="checkbox"/> Significant, pursuant to point 21.A.101. <input type="checkbox"/> Not significant, pursuant to point 21.A.101.		
Click here to enter text.		Click here to enter text.
Printed Name/Title	Signature	Date

Obr. 19 – Vzor požadavku na změnu typového návrhu. [37]

#### Part 21.A.131

K upřesnění definice „použitelných konstrukčních dat“ (applicable design data) slouží bod A.131. Ta jsou definována jako všechny nezbytné výkresy, specifikace a další technické informace nutné k vývoji výrobních dat, která budou sloužit k dosažení opakovatelných výsledků během výroby součástí. [37]

#### Part 21.A.133

Pro zjištění podmínek prokázání shody by měl žadatel následovat bod A.133. Stanovuje podmínky kladené na žadatele a způsobilost návrhu. GM (Guidance Manual) této části vysvětluje pojem „vhodné“ spolupráce mezi držitelem návrhu, výrobcem a konstrukční kanceláří. Požaduje také po žadateli prokázat potřebu pro schválení žádosti o typový certifikát produktu založené na jednom, nebo více z následujících kritérií:

- Výroba letadel, motorů, nebo vrtulí,
- Výroba součástí označených jako EPA (Označení pro neoriginální součásti)
- Zapojení do mezinárodního kooperačního programu s jinými kompetentními autoritami (např. letecké úřady cizích zemí)
- Důležitost produktu a technologie související s výrobou součástí. Schválení může v tomto případě může příslušný orgán shledat jako nejlepší nástroj k plnění svých povinností ve vztahu k řízení letové způsobilosti.
- Pokud příslušný orgán jinak schválí, že je vyžadováno splnění základních požadavků z přílohy I nařízení EK č. 216/2008. [37]

#### Part 21.A.147

Tento bod řeší zásadní změny pro již schválené produkční organizace (POA). Tyto změny zahrnují:

- Značné změny ve výrobní kapacitě, nebo metodách,
- Změny v organizační struktuře společnosti, s důrazem na změny v kontrole kvality,
- Změna odpovědného vedoucího (Osoba odpovědná za zajištění dostatečných finančních prostředků pro dodržení standardů)
- Změny ve výrobě, nebo systému kvality, které by mohly mít zásadní dopad na letovou způsobilost produktu, nebo součástí,

- Změny v umístění, nebo kontrole významných subdodavatelských prací, nebo dodávaných dílů. [37]

Před provedením změny je doporučeno, aby mezi žadatelem a příslušným orgánem došlo k výměně informací, které umožní provedení nezbytných hodnotících prací ještě před provedením změny. [37]

#### Part 21.A.247

Bod A.247 Partu 21 stanovuje podmínky, za kterých návrhové organizace musí požádat o schválení změn v „systému zabezpečení návrhu“ (Design Assurance System). Design assurance system se skládá z organizační struktury, rozložení odpovědnosti, zdrojů a procedur nezbytných pro správnou funkci návrhových organizací (DOA). Dle tohoto bodu je považováno za zásadní změny v Design Assurance systému:

- Změny ve vlastnictví, organizační struktuře, odpovědnosti a lokaci firmy,
- Změny v rozsahu schválení a typové certifikaci, a další. [37]

#### Part 21.A.433

Požadavky, za kterých bude žadateli schválen návrh opravy a uchování dat o návrhu oprav řeší bod A.433. Ten by měl být schválen v případě, že:

- Žadatel prokázal, že oprava je v souladu s referenčním typovým certifikátem,
- Nebyla zjištěna funkce, nebo vlastnost, která by mohla produkt, nebo výrobek učinit nebezpečný,
- Žadatel uvedl, že poskytl certifikační data na základě dohody s vlastníkem údajů o typové certifikaci. Vlastník musí prokázat, že je vše v souladu s předchozím bodem o bezpečném produktu, nebo výrobku. Pokud držitel souhlasil se spoluprací s držitelem potvrzení o návrhu opravy tak, aby zajistil splnění všech povinností týkajících se zachování letové způsobilosti změněného výrobku prostřednictvím souladu s bodem 21.A.451.

Důležité údaje ve spojitosti s novým návrhem oprav a jejich zaznamenávání by měly obsahovat:

- Identifikaci poškození a její hlášení,
- Dokument obsahující zdůvodnění opravy spolu s odkazy na použitelné specifikace,



- Výkres opravy, nebo instrukce s identifikačním schématem,
- Korespondence s držitelem typového osvědčení (TC), doplňkového typového osvědčení (STC), nebo povolení v rámci Evropských standardů pro APU (APU ETSO),
- Zdůvodnění s ohledem na strukturální vlastnosti jako např. pevnost, únava, tolerance poškození, a další,
- Zdokumentovaný efekt na letadlo, motory, nebo jejich systémy,
- Účinek na program údržby letounu a jeho letovou způsobilost,
- Záznam změn hmotnosti a momentů a speciálních testovacích požadavků.

Pokud jde o změny v opravách zasahující mimo schválená data, tak je po žadateli vyžadováno jejich zdůvodnění. Opravy kritických součástí motorů a nebo APU mohou být za normálních okolností schváleny pouze za účasti držitele typového certifikátu. Tím může být např. výrobce daného motoru. Požadavky uvedené v bodě A.433 se shodují s těmi v bodě A.447. Proto nebudou dále zmíněny.[37]

#### GM 21.A.91

Tento průvodce (Guidance Manual) slouží k vysvětlení, specifikování a zjednodušení pojmů drobné a velké opravy (Minor and Major repairs). [37]

Pojem velká oprava tedy charakterizuje jako:

- Výsledek opravy má na schváleném typovém návrhu předvídatelný efekt na vlastnosti struktury, hmotnost, vyvážení, systémy, operační a další charakteristiky, které ovlivňují letovou způsobilost součásti, nebo produktu.
- Oprava je klasifikovaná jako velká i v případě, že je potřeba významného pevnostního, nebo únavového testování. Případně také nezvyklých metod výroby, výběru materiálu, postprocessingu, atd.)
- Opravy, které vyžadují zhodnocení dat původní certifikace pro zhodnocení shody se specifickými požadavky.

Za drobné opravy je považováno:

- Opravy s minimálním, nebo žádným přehodnocením originálních dat pro certifikaci
- Opravy, jenž nemají výrazný efekt na hmotnost, vyvážení, strukturální pevnost, spolehlivost, provozní a další charakteristiky, které nemají důležitý dopad na letovou způsobilost součásti, nebo životní prostředí. [37]

Bod *GM 21.A.435* je z důvodu shody popsán již v bodě A.91.

#### AMC 145.A.42

Part 145 hovoří o zachování letové způsobilosti – tedy o datech údržby, kontrole kvality, nárocích na personál, certifikaci oprav a certifikaci údržbových organizací (Maintenance Repair Organization). AMC Partu 145 řeší přijatelné způsoby prokázání součinnosti s touto částí. AMC 145.A.42 pojednává o komponentech letadel, jejich kategorizaci, přijímání, dodávce a uvolnění do provozu. Zmiňuje také výrobu součástí v rámci MRO (Maintenance Repair Organization), které k tomu jsou dle partu 145 oprávněné a mají k tomu dostatečnou technickou a produkční schopnost. Součásti takto vyrobené mohou být použity pouze v rámci firmy, která je vyrobila (Organizace údržby si je tedy může vyrobit pouze pro sebe.). Oprávnění k výrobě však nepředstavuje schválení pro výrobu ani dodávku součástí pro externí subjekty. [38]

Příklady součástí, jež lze vyrábět v rámci Part-145 (Organizaci údržby) zahrnují:

- Ložisková pouzdra a vložky,
- Druhotné strukturální součásti a panely potahu,
- Lana řízení,
- Potrubí a hadice,
- Elektrická kabeláž a její sestavy,
- Tvářené a opracované plechy potahu určené k opravám.

Výroba těchto součástí by měla být v souladu s údaji uvedenými v manuálech oprav, modifikačních schématech, servisních bulletinech, nákresech, nebo by mělo být schváleno kompetentním úřadem. Tyto součásti nemohou disponovat dokumentem o uvolnění do provozu EASA Form 1. [38]

### Shrnutí kapitoly

Všechny informace uvedeny v této kapitole jsou pouze základními body problematiky aditivní výroby součástí pro letecký průmysl. Dle CM-S-008 je doporučeno zájemcům o aditivní výrobu leteckých součástí kontaktovat Evropský úřad pro civilní letectví (EASA), případně CAA (Civil Aviation Authority) příslušné země. Pro subjekty, které by chtěly začít s výrobou součástí pro letectví je nutné nejprve získat schválení pro produkční organizace (POA) od Úřadu pro Civilní Letectví (ÚCL), případně EASA. V otázce návrhu součástí určených k výrobě aditivními technologiemi, je nutné zřízení DOA (Design Organization Approval). V budoucnu je možné očekávat větší přehlednost požadavků pro aditivní výrobu. S narůstající produkcí a zvětšujícími se zkušenostmi jednotlivých úřadů se také očekává zmírnění požadavků za určitých podmínek. Ve vztahu k aditivní výrobě může mezi zmírněné požadavky v budoucnosti patřit vyřazení nutného komplexního nedestruktivního testování. Toho může být dosaženo za předpokladu, že výrobce prokáže konzistentní výsledky, tedy že se vlastnosti totožných součástí vzájemně výrazně neliší. To bylo prokázáno firmou Boeing v kooperaci s Federálním úřadem pro letectví (FAA). Lze očekávat, že pokud tyto navržené změny budou schváleny, tak ostatní letecké úřady je budou následovat, včetně EASA.

### 3. Výroba komponentů pro letecký průmysl pomocí aditivních technologií

Aditivní technologie otevírají nové spektrum příležitostí, které nejsou dostupné klasickými metodami výroby. Z pohledu návrhu součástí lze využít AM k tvorbě vnitřních prostor a kanálů sloužících k chlazení či dopravě kapalin. Dále také integraci několika součástí do jednoho výrobního celku nebo k redukci hmotnosti. Výše zmíněné výhody ovšem nemusí nutně znamenat, že výroba aditivní technologií je ekonomicky výhodná. Důvodem je jejich komplexita a také vlastnosti různých druhů aditivní technologie samotné. Například u metod pracujících na principu Powder Bed Fusion (PBF) je cílem co nejvíce naplnit pracovní komoru. Důvodem je, že časový rozdíl mezi tavením vrstvy jednoho a více výrobků je minimální, díky čemuž získáváme větší výtěžek na jeden tisk. Oproti tomu u metod FDM (Filament Deposition Modeling) bývá větší rozdíl mezi tvorbou vrstvy pro jeden model a více modelů.

V současné době prochází letecký průmysl proměnou, která je způsobena aditivní výrobou a jejími vlastnostmi. AM umožňuje výrobu na míru – přizpůsobení součástí potřebám zákazníka v relativně krátkém časovém horizontu. To se týká především součástí interiéru letadel a nekritických součástí. Aerolinky nebo údržbová centra již v dnešní době využívají AM k produkci přizpůsobených náhradních dílů, a to i v řádu několika hodin. Takto AM využívá např. aerolinka EasyJet, která vyprodukovala 5000 loketních opěrek během 2 týdnů. Výrobce Airbus dále odhaduje, že AM bude použita k výrobě až 3000 druhů náhradních dílů na jejich letounech do roku 2025. [39]

Cílem této kapitoly je demonstrace schopností aditivní technologie a její použití k výrobě součástí, náhradních dílů, prototypů, nebo nástrojů. Součást byla vzhledem k možnostem a aktuální situaci zvolena a upravena tak, aby předvedla výhody AM a efektivní využití softwarových nástrojů.

### 3.1. Výběr a návrh součástí

Při výběru vhodného dílu padla volba na součást interiéru. Součásti interiéru totiž patří k nejčastěji vyměňovaným dílům v dopravních letadlech a ve většině případů jsou vyrobeny z polymerních nebo kompozitních materiálů. Zvolena byla podpěra jídelního stolku, a to od sedadla ekonomické třídy aerolinky British Airways. Jako předlohy sloužily fotografie a byl zakoupen 3D model [40] sedačky, který sloužil pouze k orientačním rozměrům součásti. Na obr. 20 lze vidět umístění součásti na sedadle (detail v pravé části). Tato součást drží téměř celou váhu stolku i s věcmi na něm umístěnými. Výrobním materiálem je dle odhadu slitina hliníku.



*Obr. 20 - Fotografie sedadla ekonomické třídy aerolinek British Airways s detailem na zvolenou součást.[41]*

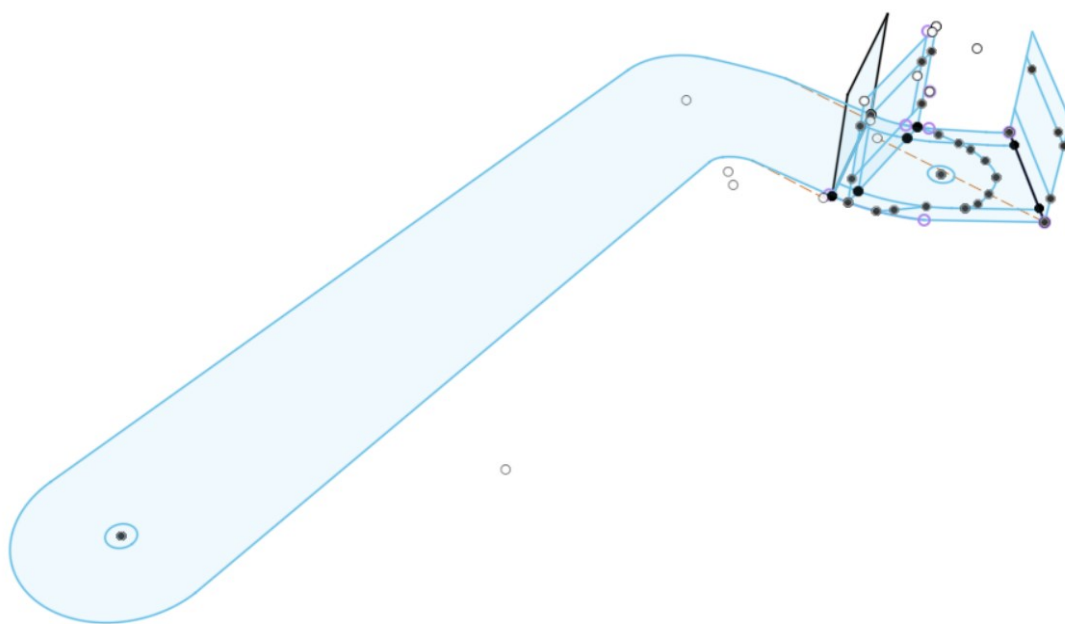
Obr. 21 zobrazuje zakoupený model součásti. Vlevo lze vidět její umístění na modelu. Vpravo je součást vyobrazena samostatně. Tento model sloužil pouze jako předloha pro orientační míry k vytvoření přesnějšího modelu součásti. Obě fotografie vznikly za použití funkce *render* v programu Fusion 360. Tato funkce umožňuje vytvoření realistických fotografií vytvořených 3D modelů.



*Obr. 21 - 3D model původní součásti umístěné na sedadle (vlevo) a samostatně (vpravo).*

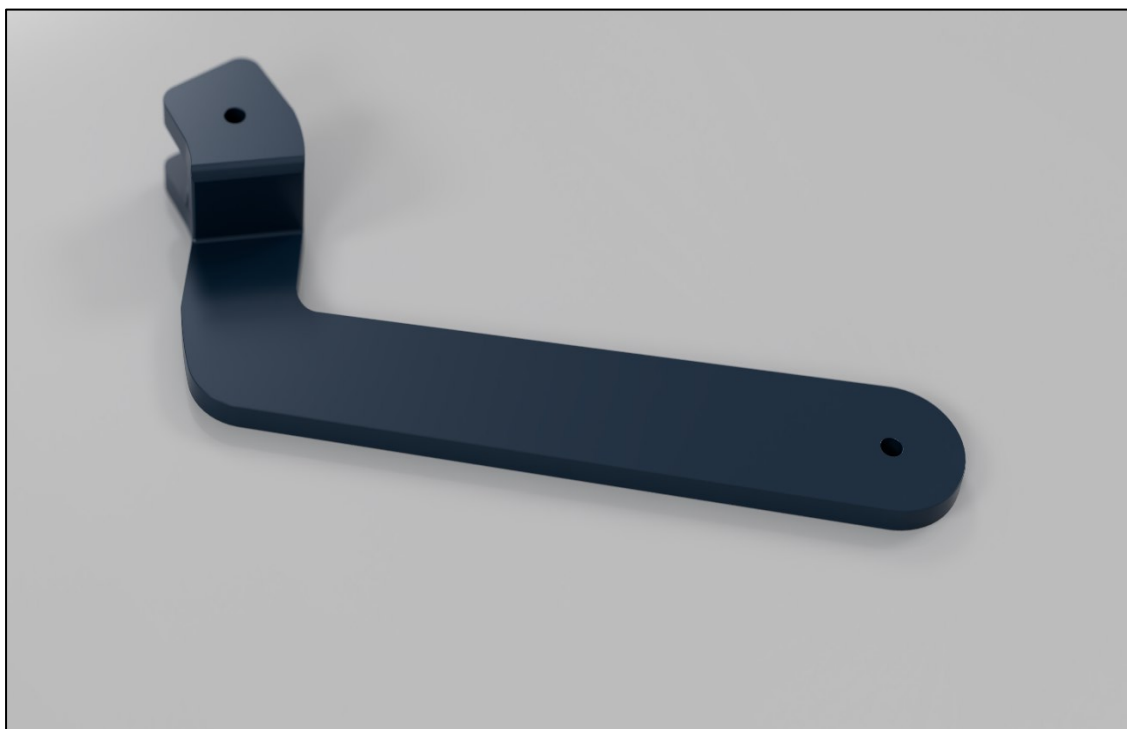
*Fotografie byla vygenerována v programu Fusion 360 za pomoci funkce render. [40]*

Přesnější model byl vytvořen opět v programu Fusion 360. V počátku procesu návrhu byly zjištěny míry součásti ze zakoupeného 3D modelu a upraveny tak, aby přibližně odpovídaly reálné předloze. Poté byl za pomoci funkce *sketch* programu Fusion 360 vytvořen náčrt v několika rovinách, který lze vidět na obr. 22. Funkce *sketch* slouží k vytvoření náčrtu a obrysů součástí.



Obr. 22 - Náskres modelu v programu Fusion 360.

Pro převedení modelu do 3D prostoru a vytvoření kompletního tvaru součásti byly využity funkce *push/pull*, *extrude* a *fillet*. Takto vytvořený model lze vidět na obr. 23.



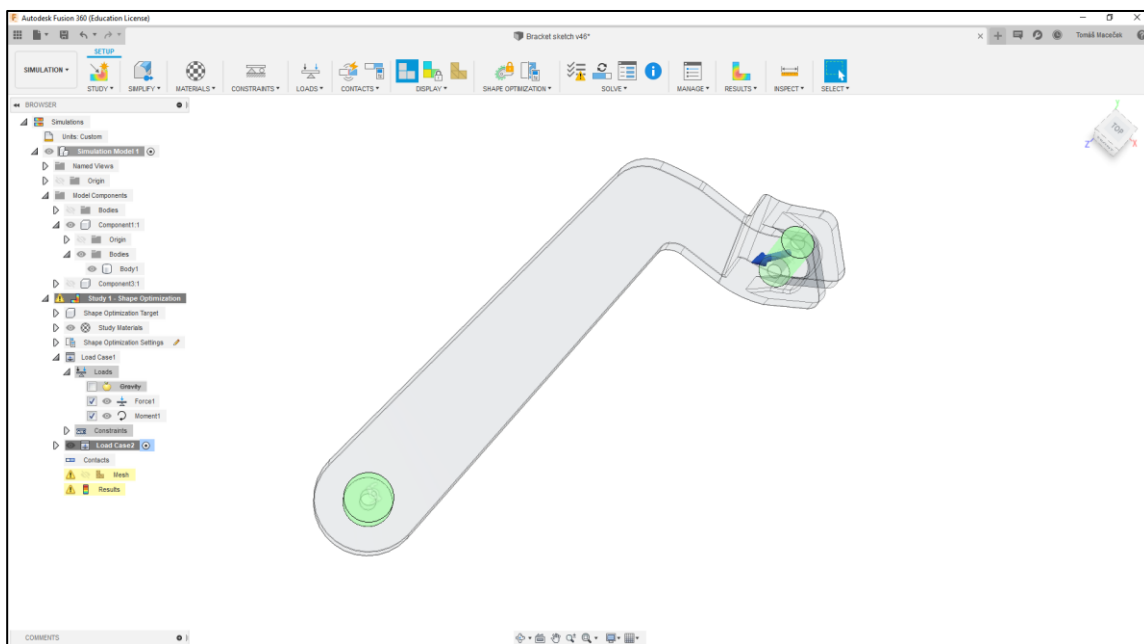
Obr. 23 - Vytvořený 3D model držáku.

Funkce *push* a *pull* slouží k vytažení, protlačení, nebo zmenšení součásti. Funkce *extrude* pracuje na podobném principu, tedy vytažení součástí z předem určeného nákresu plochy. *Fillet* je výhodným nástrojem pro srážení a vytváření malých rádiusů a oblých hran.

Jako materiál vytvořeného držáku byl v programu Fusion 360 zvolen polymer ABS. Tento termoplast je v průmyslu běžně využíván pro výrobu součástí vstřikováním, v posledních letech však také aditivní výrobou. Byl zvolen z důvodu jeho pevnosti a snadné opracovatelnosti. ABS lze totiž opracovávat rozpouštědly jako např. acetonem. Tím lze ABS chemicky spojovat, nebo také vyhladit. To je obzvláště výhodné u součástí vyrobených metodou FDM, kde dochází k tzv. schodovému efektu, kdy jsou jednotlivé vrstvy patrné pouhým okem.

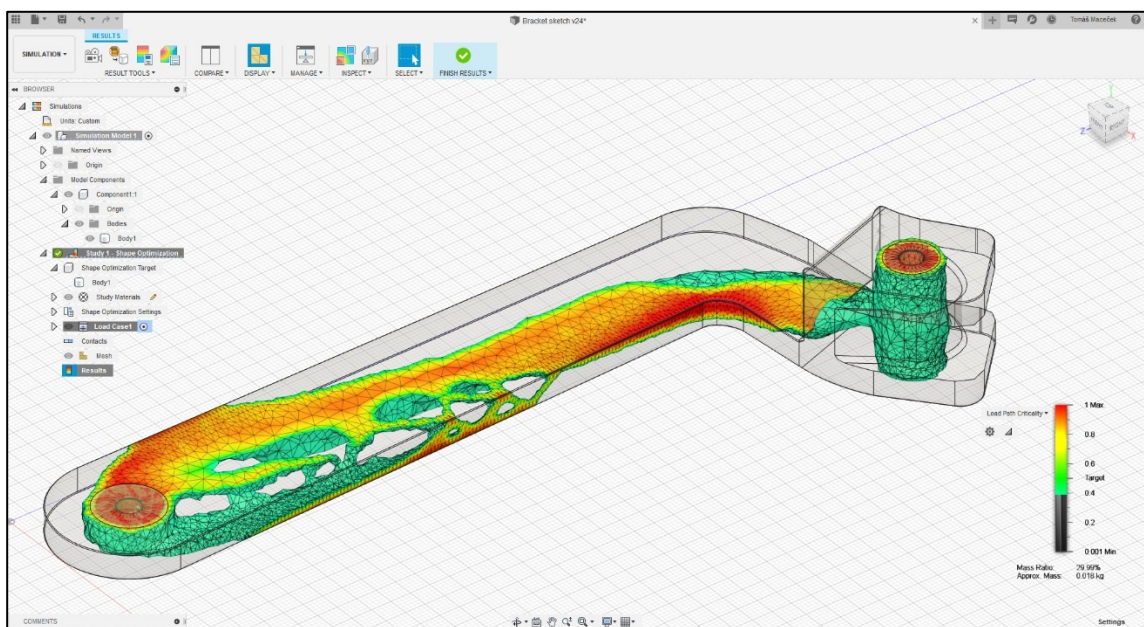
V další fázi byl 3D model součásti topologicky optimalizován. První možností byl software od firmy Altair Inspire. Ten umožňuje nejen návrh součástí, ale také jejich topologickou optimalizaci, spolu s širokým spektrem analýz. Díky přítomnosti malých rádiusů a ploch však program vykazoval chyby a problémy s velikostí elementu (nejmenší velikost plochy). Kvůli tomu byla topologická optimalizace nakonec provedena v programu Fusion 360. Ta započala zadáním podmínek a nároků. Mezi podmínky byly zařazeny roviny symetrie a váhový cíl, který byl stanoven na 30 % původní hmotnosti a maximalizaci tuhosti. Dále byly z optimalizační oblasti vyjmuty díry spolu s okolními oblastmi, aby se zachoval prostor pro upevnění šroubu a čepu, což lze vidět na obr. 24. Nároky na součást se skládají ze zadané síly 700 N a momentu 3 N/m. Následně byl z vytvořeného modelu vygenerován tzv. mesh. Jedná se o strukturu, která se skládá ze soustavy polygonů a je nutná pro provedení topologické optimalizace ve Fusionu 360.





Obr. 24 – Navržená součást se zadanými podmínkami a požadavky.

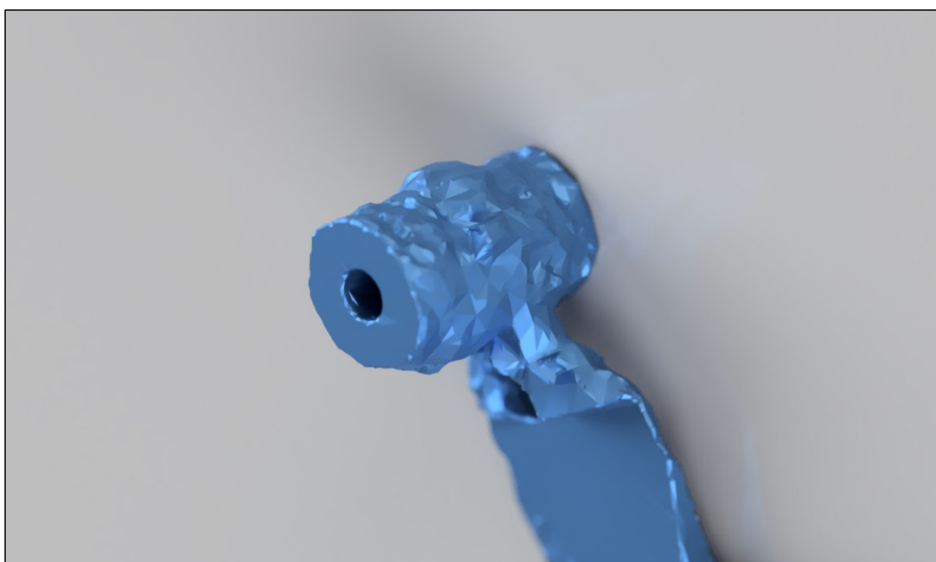
Po vygenerování struktury mesh byla provedena topologická optimalizace, která je ve Fusion 360 řešena skrze cloudové servery online. Výsledek optimalizace lze vidět na obr. 25.



Obr. 25 - Výsledek topologické optimalizace v programu Fusion 360. Váhový cíl činí 30% původní hmotnosti.

Takto vytvořený model ovšem není ideální pro použití v praxi. Důvodů je hned několik:

- Hrubá struktura tvořená ostrými hranami (obr. 26), což výrazně zvyšuje riziko vzniku únavových trhlin a skrytých vad po výrobě, ale také náročnost výroby samotné;
- Spousta malých otvorů a v některých případech zbytečně složitých tvarů, které mohou způsobit problémy během výroby.

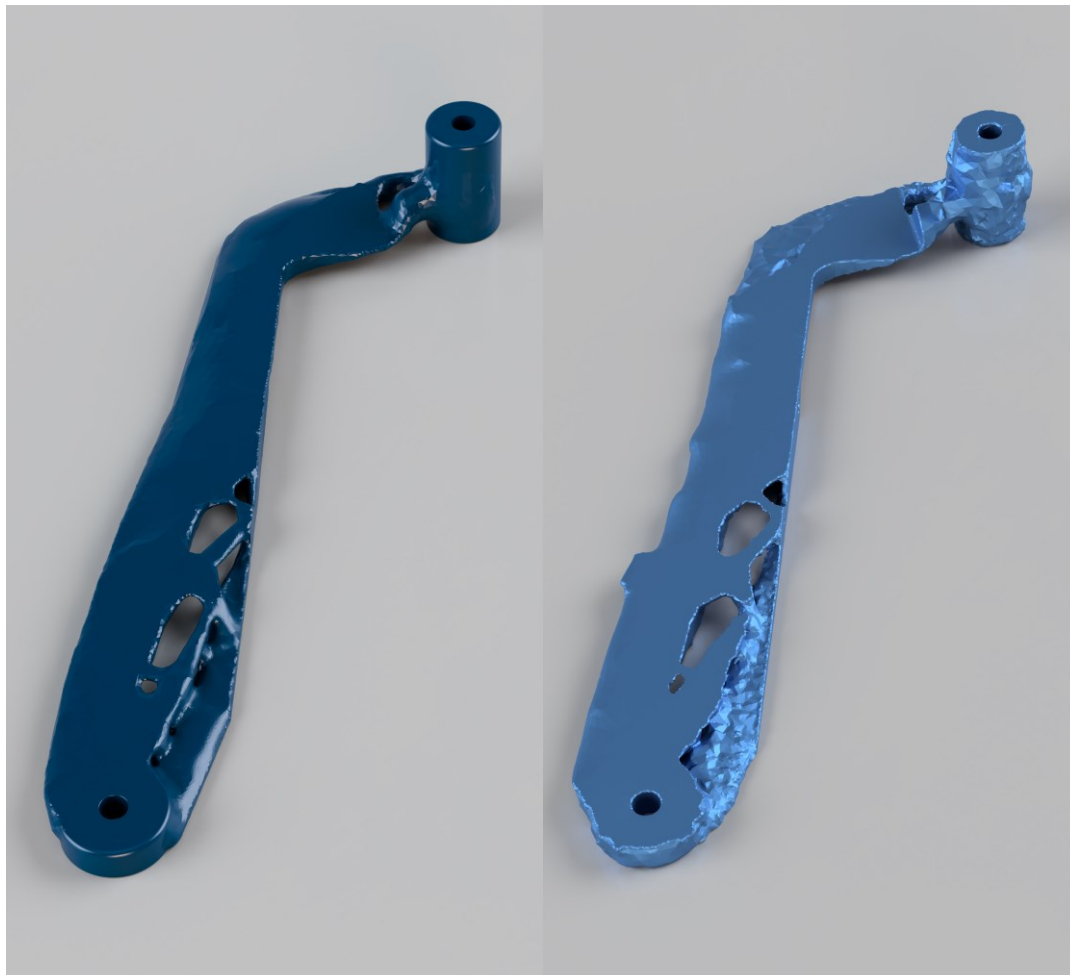


Obr. 26 - Detail na vrchní část modelu (oko) po provedení optimalizace. Model se nachází ve stavu před vyhlazením.

Z důvodů uvedených výše je tedy nutno provést úpravy modelu zahrnující zjednodušení a zpřesnění ploch a rozměrů. Provedení těchto úprav lze cestou vytvořením náčrtu a celého modelu znovu za pomoci využití získaných dat nebo vyhlazení a upravení modelu za pomoci funkcí *mesh control*, případně *T-spline*. V tomto případě bylo využito úpravy modelu za pomoci nástrojů pro úpravu „mesh“. Mezi tyto nástroje patří funkce *erase and fill*, která je schopna nahradit chybějící polygony nebo je vymazat a nahradit novou strukturou o jiném počtu polygonů. Dalším užitečným nástrojem při úpravě mesh je funkce *remesh*, která nahradí všechny polygony ve zvolené oblasti zvoleným počtem nových polygonů. Pro jejich řezání a odebírání lze využít také funkce *plane cut*, která umožňuje odebírání materiálu v požadovaných rovinách. Mesh lze také vyhladit za pomoci funkce *smooth*.

Po využití výše zmíněných nástrojů byla pro maximální přesnost znovu vytvořena část náčrtu s dírami a jejich okolím a za pomoci funkce *extrude* převedena na 3D model. Výsledek provedených úprav lze vidět na obr. 27 v porovnání s neupravenou součástí.

Na obr. 27 lze vidět, že rozměry součásti opracované po topologické optimalizaci se výrazně neliší. Došlo ovšem k redukci ostrých hran a přebytečných kontur nijak nepřispívajících k pevnosti součásti. Také došlo k zpřesnění rozměrů děr, které díky převedení na mesh ztratily přesnost. Fotografie byla vygenerována pomocí funkce render.

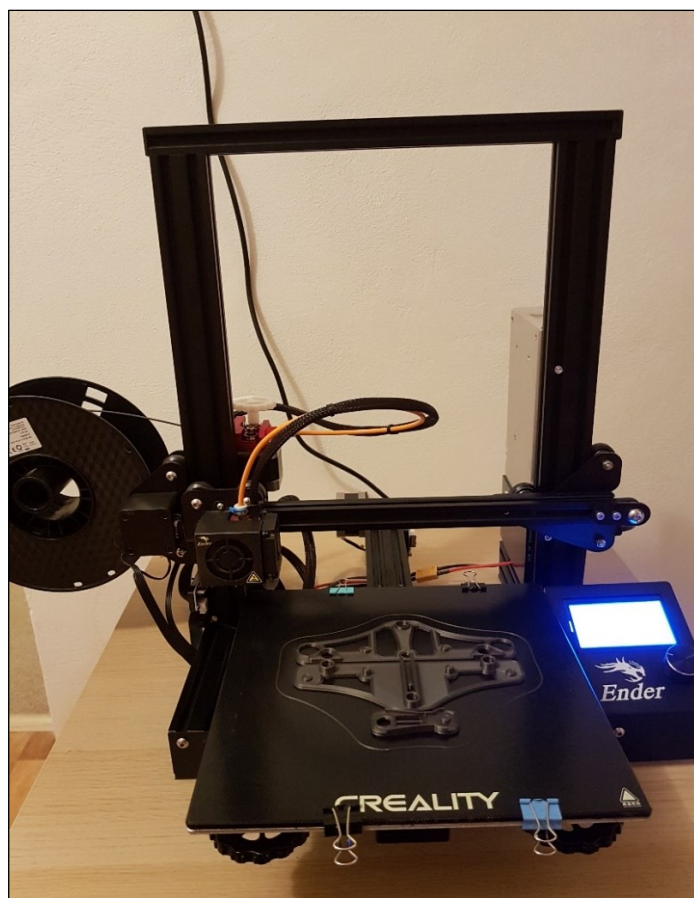


*Obr. 27 - Výsledek úpravy optimalizované součásti (vlevo) v porovnání s neupravenou (vpravo).*

### 3.2. Výroba součásti

Pro výrobu součástí byla použita 3D tiskárna metody FDM od firmy Creality - Ender 3 Pro. Tiskárna je opatřena modifikovanou základní deskou firmy BigTreeTech SKR mini E3 v1.2. s nahráním firmwarem Marlin verze 2.0.5.3., vylepšenými pružinami pracovní podložky a kovovým extruderem (Extruder je modul, jehož úkolem je doprava materiálu ve formě plastové struny skrze trubičku do zahřáté trysky).

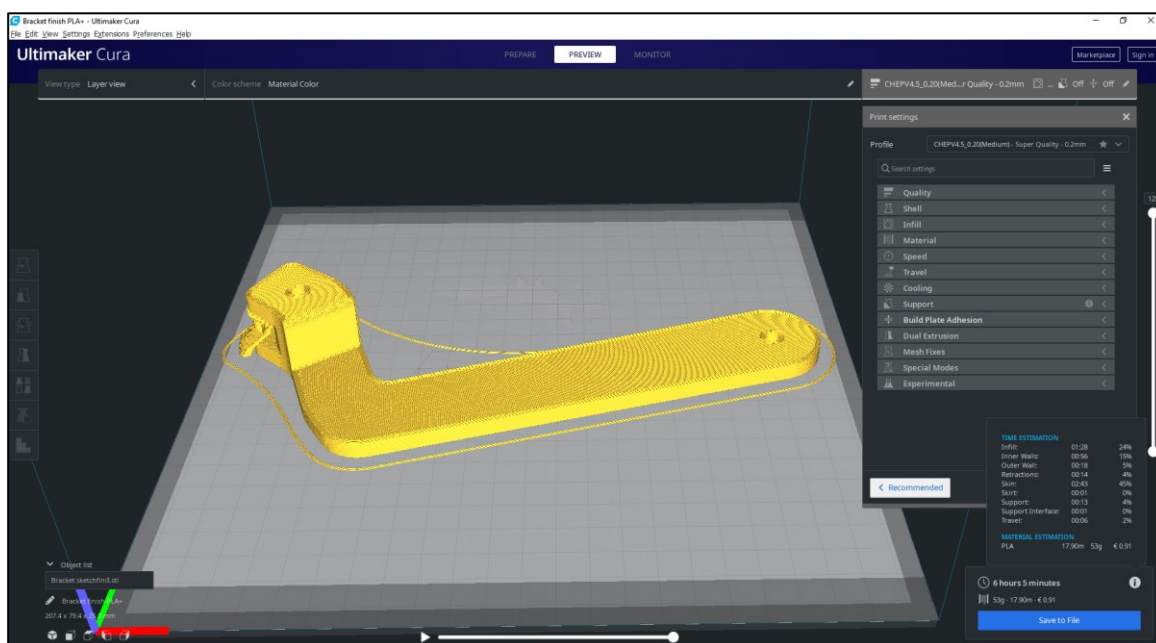
Výše zmíněné modifikace zlepšují spolehlivost a kvalitu tisku. Ender 3 Pro (obr. 28) patří mezi sérii cenově dostupných tiskáren schopných tisku termoplastů, obvykle v rozmezí 190 až 260 °C. Je také vybavena vyhřívanou podložkou, která pracuje při teplotách až 110 °C.



*Obr. 28 - 3D tiskárna Ender 3 Pro.*

Pro správnou funkci a přesnost tiskáren je nutná kalibrace. Ta byla provedena pomocí volně dostupných modelů na portálu thingiverse. Po kalibraci tiskárny bylo nutné 3D model připravit pro tisk za pomoci „slicing“ softwaru. Tento software model „rozřeže“ na jednotlivé vrstvy. Následně trajektorie těchto vrstev a celkové nastavení tisku převede na programovací jazyk G kód. G kód je používán nejen 3D tiskárnami, ale také například obráběcími nebo řezacími stroji. Jako „slicing“ software bylo zvoleno řešení od společnosti Ultimaker Cura.

Tento program se specializuje na přípravu tisku aditivních technologií FDM. Dokáže na základě zadaných parametrů vypočítat cenu a množství spotřebovaného materiálu, ale také výslednou váhu součásti. Na obr. 29 lze vidět 3D model prototypu navržené součásti připravený na tisk. Za povšimnutí také stojí zobrazení časové náročnosti jednotlivých úkonů. Umožňuje také detailní prohlídku vnitřních struktur součásti i simulaci výsledného vzhledu.



Obr. 29 - Software Ultimaker Cura.

V tab. 4 lze vidět základní parametry tisku prototypu, které jsou:

- Výška vrstvy – Vertikální výška, kterou má jedna vyrobená vrstva v mm. Ta přímo ovlivňuje rychlost tisku a výslednou kvalitu součásti. Obecné pravidlo je, že čím je menší výška vrstvy, tím má součást lepší kvalitu povrchu díky redukci schodového efektu (viditelnost jednotlivých vrstev).
- Šířka vrstvy – Horizontální šířka jedné vrstvy.
- Rychlost tisku – Rychlost pohybu trysky během výroby součásti. Byla určena zprůměrováním hodnot rychlosti vnějších a vnitřních stěn. Tuto hodnotu lze nastavovat různou pro vnitřní a vnější vrstvy, podpory, nebo vnitřní výplň pro optimalizaci času tisku a kvality.
- Počet stěn – Určuje počet vertikálních vrstev po vnějším nebo vnitřním obvodu součásti.
- Hustota výplně – Označuje procentuální poměr hmoty uvnitř součásti. 100% hustota výplně by tedy odpovídala plné součásti, zatímco 50% znamená, že uvnitř součásti materiál zaujímá pouze 50 % hmoty (zbytkem je vzduch).
- Tvar výplně nám ovlivňuje v kombinaci s počtem stěn a dalšími faktory celkovou pevnost a stabilitu součásti. Výplň druhu Tri-hexagon byla zvolena proto, že patří mezi nejpevnější vzory náplní součástí vyráběných metodou FDM. Jde o vzor podobný včelí plástvi.



- Teplota trysky – Liší se v závislosti na materiálu, ovšem většinou platí, že pro materiál PLA se tato teplota pohybuje od cca 190 až do 210 °C. Teplota však může být i vyšší, jako např. v případě většího průtoku materiálu skrze trysku, aby nedocházelo k nedostatečnému tavení materiálu. Teplota trysky může přímo ovlivňovat také výslednou kvalitu součásti a vlastnosti materiálu.
- Teplota vyhřívané podložky – Vyhřívaná podložka patří mezi důležité součásti 3D tiskáren. Kdyby byl rozdíl mezi teplotami právě položené vrstvy materiálu a spodní vrstvou, případně podložkou velký, mohlo by dojít ke ztrátě přilnavosti a/nebo zkroucení materiálu. 60°C je obvyklé nastavení pro teplotu podložky pro materiál PLA.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška vrstvy	0.2	mm
Šířka vrstvy	0,4	mm
Rychlost tisku	37,5	mm·s <sup>-1</sup>
Počet stěn	4	[ - ]
Hustota výplně	60	%
Tvar výplně	Tri-Hexagon	[ - ]
Teplota trysky	200	°C
Teplota podložky	60	°C

*Tab. 4 - Parametry tisku prototypu*

Následoval tisk prototypu z materiálu PLA+ se shodnými parametry uvedenými v tab.4. Materiál byl konkrétně černé barvy, PLA+ od firmy Gembird (obr. 30). Součást byla tisknuta na podložce z boro-silikátového skla, což je důvodem vysokého lesku spodní vrstvy. Tisk proběhl bez komplikací a doba trvání tisku činila přibližně 6 hodin.

Tato doba se dá dále snížit změnou nastavení např. rychlosti tisku nebo výškou vrstvy, ale také použitým zařízením. Po zkontrolování vyrobeného prototypu byly parametry tisku a bylo rozhodnuto o výrobě součásti z materiálu ABS.



*Obr. 30 - Vyrobený prototyp navržené součásti. Materiál Gembird PLA+, doba tisku přibližně 6 hodin.*

Úprava parametrů pro výrobu součásti z materiálu ABS zahrnovala:

- Snížení hustoty výplně z 60 na 50 %;
- Zvýšení teploty trysky na 230 °C;
- Zvýšení teploty pracovní podložky z 60 na 105 °C.

Dále byla kvůli problémům s přilnavostí materiálu vyměněna skleněná podložka za texturovanou magnetickou, která problémy s přilnavostí do velké míry zlepšila. Bylo využito funkce „draft shield“, která vytvoří okolo modelu v určité vzdálenosti stěnu o šířce jedné vrstvy, která vytváří „štít“, který brání studenějšímu proudu vzduchu z okolí k proniknutí k součásti. To je u materiálu ABS důležité, protože je náchylný na teplotní změny. Tyto teplotní změny mohou způsobit praskání nebo zkroucení materiálu, resp. jednotlivých vrstev. Proto byla také sestrojena teplotní komora, která uzavřela prostor tiskárny od okolí, aby se předešlo vlivu působení teploty a proudění v místnosti. V tab. 5 lze vidět seznam změněných základních parametrů tisku vůči nastavení tisku prototypu.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Hustota výplně	50	%
Teplota trysky	230	°C
Teplota podložky	105	°C

*Tab. 5 - Tabulka změněných parametrů tisku součásti z ABS.*

Tisk součásti z ABS provázely zprvu problémy s přilnavostí k podložce. Hmotnost této součásti je dle programu Cura 50 gramů. Tisk trval 6 hodin a 50 minut. Součást po tisku lze vidět na obr. 31. Časový rozdíl mezi součástmi z PLA+ a ABS je způsoben přidáním funkce draft shield a brim.



*Obr. 31 - Navržená součást před odstraněním podpor a ochranného obalu "draft shield".*

*Materiál ABS, doba tisku 6 hodin a 50 minut.*

Následovalo opracování a odebrání podpor a draft shieldu. Čistá hmotnost součásti bez podpor a draft shieldu činí 45 gramů. Během tisku nedošlo k větším problémům, vyskytlo se pouze menší zkroucení, jenž způsobilo vznik snadno odstranitelné drážky od horké trysky na povrchu součásti.

Další v řadě byla výroba prototypu optimalizované součásti. Stejně jako u navržené součásti byl jako výchozí materiál zvolen Gembird PLA+ černé barvy. Cílem výroby prototypu bylo zjištění vyrobitelnosti a optimálních parametrů tisku. Výsledek je patrný na obr. 32. Prototyp neprošel náročnějším opracováním po tisku, proto lze i tak vidět v záhybech a těžce přístupných místech jednotlivé vrstvy. Mírné opracování zahrnovalo mokré broušení brusným papírem o zrnitosti 200.





*Obr. 32 - Prototyp optimalizované součásti. Materiál Gembird PLA+, součást je ve stavu mírného opracování.*

Doba tisku tohoto prototypu činila 4 hodiny a její hmotnost je 22 g. Nastavení pro tuto součást je téměř shodné s nastavením původního prototypu součásti. Jediným rozdílným parametrem je hustota náplně, jenž byla změněna na 50 %.

Po tisku prototypu a upravení nastavení byla vytisknuta optimalizovaná součást z materiálu ABS. Pro tisk bylo opět využito teplotní komory a nastavení draft shield. Parametry tisku byly shodné s prototypem z materiálu ABS (tab. 5). Optimalizovanou součást lze vidět na obr. 33.



*Obr. 33 - Topologicky optimalizovaná součást. Materiálem je polymer ABS.*

U součásti na obr. 33 bylo provedeno vlhké broušení brusným papírem o hrubosti 200, 400 a 1000. Mokrý broušení bylo použito proto, aby nedošlo k zahřátí součásti na teplotu, která by způsobila deformace, případně poškození součásti a snížilo se šíření drobných částic plastu.

Po vybroušení byl proveden postup chemického opracování za pomoci acetonu. Aceton při krátkém působení na polymer ABS způsobí roztavení vrstev a jejich následné spojení. Tím dojde nejen k vyhlazení vrstev, ale také zvýšení pevnosti a dodá lepší estetické vlastnosti. Chemické opracování proběhlo za pomoci acetonových výparů v uzavřené komoře. Po vnitřních stranách komory byl umístěn materiál za pomoci magnetů, jenž byl namočen do acetonu. Následně byla součást do komory vložena na 30 minut. Po uplynulé době byla součást vytáhnutá a ponechána na vzduchu pro vypaření zbytkového acetonu. Během fáze vytahování a schnutí je nutné dbát opatrnosti, jelikož povrch součásti je změkčený a je velmi snadné jej znečistit, případně poškodit. Po vypaření zbytkového acetonu byla součást naposledy položena do uzavřené komory, opět na 30 minut. Celkový čas chemického opracování činil přibližně 2 hodiny, tento čas však lze značně redukovat za použití profesionálního vybavení nebo zvýšených teplot pro urychlení vypařování acetonu, případně schnutí součásti. Optimalizovanou a chemicky opracovanou součást z polymeru ABS lze vidět na obr. 34. [42]



*Obr. 34 – Detail na optimalizovanou součást po chemickém opracování.*

Tisk trval 4 hodiny a 50 minut a nedošlo během něj k problémům. Součást má po odebrání podpor hmotnost 20 gramů, což představuje přibližně 56% redukci v porovnání s původní součástí.

### Shrnutí

Za pomoci programu Fusion 360 lze zjistit hmotnost původní součásti. Za úvahy, že původní součást bude vyrobena z materiálu Al 6061, tak by její váha činila 151 gramů. Al 6061 je svařitelná slitina hliníku s dobrými mechanickými vlastnostmi. V případě hmotnostního porovnání s topologicky optimalizovanou součástí z ABS nám tedy polymer vyjde o téměř 87 % lehčí než součást vyrobená ze slitiny hliníku. Při využití takto optimalizovaných součástí např. v letounu společnosti Airbus A350 s kapacitou 410 pasažérů v ekonomické třídě, nám celková hmotnost všech těchto držáků vyrobených ze slitiny hliníku připadá na 124 kilogramů. Kdyby bylo využito polymerních materiálů (s využitím vhodného druhu pro letecký průmysl, jako např. Nylon PA12), tak by se celková hmotnost takto vyrobených součástí držela pod hodnotou 20 kg. To by představovalo úsporu hmotnosti 94 kg, resp. 83 %, přičemž produkce jedné součásti je možná v řádu několika hodin. V případě zobecnění vlastností ABS a pominutí jeho nevhodných vlastností pro letecký průmysl jako např. hořlavost, se využití polymerů a celkově aditivní výroby v leteckém průmyslu jeví jako velká příležitost pro výrobce a provozovatele letadel. Může vést ke snížení nejen hmotnosti letounu, ale také zavedení konceptu rychlých náhradních dílů. Tímto se dále redukuje celkové náklady spojené s výrobou a skladováním součástí. [43]

Postup aditivní výroby součástí lze shrnout do následujících bodů:

- Získání a optimalizování modelu – To může proběhnout několika způsoby. Tedy získáním již existujícího modelu, nebo vytvořením nového. Nový model může být vytvořen jako součást klasické konstrukce, případně být optimalizován. Optimalizace však vyžaduje další analýzy a přidává další úkony navíc. Může však vyústit v lepší hmotnost, nebo i pevnostní parametry součásti, případně také zvýšení výtěžnosti stroje díky úbytku přebytečného materiálu.
- Kalibrace a příprava aditivní výroby – Tento postup zahrnuje kalibraci a přípravu stroje samotného, zvolení správných parametrů, ale také přípravu modelu samotného. K tomu je využito tzv. „slicing“ softwaru, jehož funkce a využití je popsána v kapitole 1.1.1., případně 3.1.

- 3D tisk součástí
- Post-processing – Výraz z anglického jazyka pro opracování po výrobě. Tento postup může zahrnovat odstranění podpor vzniklých během výroby, opracování, případně obrobení součástí do požadovaného tvaru, lakování součástí, a další operace nutné k dosažení finálního výrobku.

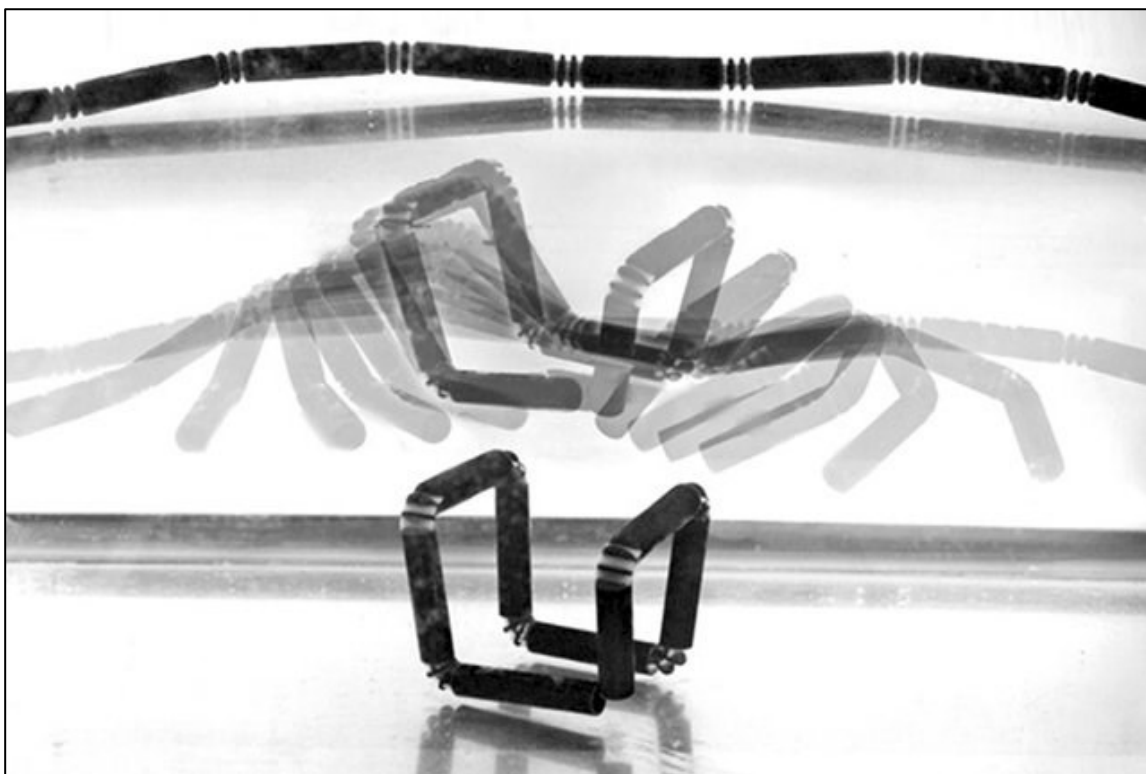
## 4. Budoucnost aditivních technologií v leteckém průmyslu

Současný stav aditivních technologií naznačuje, že letecký průmysl bude jedním z jejich pevných základů. Důvodem je, že součásti pro letecký průmysl jsou produkovány v malých sériích, ale také vysoká přidaná hodnota těchto součástí. Využití AM v letectví je široké, ale stále jsou otevřeny různé cesty, jak jej značně vylepšit. Cesty tohoto vylepšení by se daly rozdělit na 2 způsoby:

- Ekonomické – Značné snížení pořizovacích a provozovacích nákladů,
- Technologické – Zrychlení a vylepšení produkce, nové technologické prvky.

V obou případech se v porovnání se stávajícím stavem aditivní výroby (časová a ekonomická náročnost) bude jednat o značné zlepšení a bude dále vést k dalšímu růstu nejen na trhu leteckého průmyslu. V dnešní době již probíhají snahy o snížení pořizovacích nákladů. Kromě již zkušených firem jde také o různé projekty a malé společnosti. Za zmínku v tomhle případě stojí německý projekt One Click Metal, který se snaží snížit ceny aditivní výroby kovových součástí. Jde o projekt firmy TRUMPF, jenž sama patří mezi společnosti s tradicí v oboru aditivní výroby. [44]

Mezi technologické pokroky bude v budoucnu patřit urychlení a zjednodušení výroby (jako například odstranění nutnosti postprocessingu u některých metod AM) a očekávání ohledně vylepšení povrchové kvality součástí. Mezi nové technologické prvky může patřit tzv. „4D printing“. Jde o využití již stávajícího konceptu 3D tisku pro vytváření součástí, které se budou skládat z různých materiálů. Mezi tyto materiály mohou patřit tzv. „chytré materiály“, které se vyznačují programovatelností. Tato programovatelnost může znamenat např. nahrazení senzorů a jejich integrace do struktury letadel, což díky snížení počtu součástí a optimalizace tvaru bude znamenat další redukci hmotnosti. V budoucnu může jít díky 4D tisku také o integraci nanotechnologií do aditivní výroby. Za pomoci integrace několika materiálů do stejné struktury bude možné využít efektu aeroelasticity, vylepšit tepelnou a zvukovou izolaci součástí, nebo využít rozdílné tepelné roztažnosti materiálů pro změnu tvaru. Funkce změny tvaru se dosahuje využitím vláken, jenž mají „tvarovou paměť“. Ty jsou následně termomechanicky programovány (nastavení výchozího tvaru, do kterého se při určité teplotě navrátí). Příklad takového chování materiálu lze vidět na obr. 35. Na obrázku se nachází součást, jež je po zahřátí na předem definovanou teplotu schopna návratu do původního tvaru. [46]



*Obr. 35 - Demonstrace 4D tisku. Součást je po změně teploty schopna návratu do původního tvaru. [46]*

Zástupce 4D tisku již v dnešní době tvoří metoda Polyjet. Existují ovšem i další metody, které lze tomuto přizpůsobit. Tím mohou být například metody DED (Direct Energy Deposition) nebo FDM (Fused Deposition Modeling). [10], [45]

Dle studie [45] lze očekávat růst trhu s 4D tiskem o 42,5 % mezi lety 2019 a 2025, dosahující hodnoty až 500 mil. USD. Zavedení této technologie bude znamenat velké změny nejen ve stavbě, ale také návrhu letadel a díky digitalizaci a dalšímu pokroku v oblasti softwaru se budou překážky mezi nimi dále zmenšovat. [45]

AM patrně plně nenahradí klasické metody výroby jako odlévání a obrábění, ale část tohoto trhu v budoucnu ukrojí. Očekává se další růst, a to až na 3 miliardy USD v roce 2022. To odpovídá každoročnímu růstu trhu přibližně o 27.4 %. Je možné tvrdit, že v leteckém průmyslu se bude nadále zvětšovat trend transformace stávajících součástí vytvářených konvenčními metodami na aditivně vyráběné a této technologii přizpůsobené. Je obtížné predikovat přesný vývoj, ale lze říci, že narůstající zkušenosti úřadů, výrobců a jejich vzájemná spolupráce vyústí ve zrychlení procesu certifikace a schválení aditivně vyráběných součástí. [45]

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření studijního materiálu obsahujícího postup výroby součástí pro letecký průmysl pomocí aditivních technologií. V úvodu práce byla popsána historie a funkce aditivní výroby. Metody výroby pomocí aditivních technologií byly roztrženy podle mezinárodní normy ISO, popsány jejich funkce a význam pro letecký průmysl.

Byly shrnuty legislativní požadavky pro aditivní výrobu v rámci Evropské agentury pro bezpečnost civilního letectví a rozebrány pro návrhové (DOA), produkční (POA) a údržbové (MRO) organizace ve vztahu k aditivní výrobě dle dokumentu CM-S-008. Na základě toho byly požadavky úřadu vyhodnoceny a vydáno doporučení pro zájemce o aditivní výrobu součástí pro letecký průmysl.

Tato práce se také zaměřila na praktické využití aditivních technologií. Pro demonstrativní účely byl zvolen držák stolku sedadla ekonomické třídy. Tato komponenta byla vybrána z několika důvodů – je jednoduchá na výrobu a díky použitému materiálu a odhadovanému zatížení se nabízí prostor pro snížení hmotnosti v řádu několika desítek procent. Takto navržená součást byla topologicky optimalizována s hmotnostním cílem 30 % v porovnání s původní součástí. Po stádiu návrhu, optimalizace a simulací došlo k výrobě nejen navržené, ale také optimalizované součásti. V případě vyrobených dílů bylo prokázáno, že díky aditivní výrobě lze výrazně snížit hmotnost, ale také vyrábět součásti v řádu několika hodin dle potřeby.

Při uvážení výsledků dosažených při výrobě součásti lze tvrdit, že aditivní technologie mají nejen v leteckém průmyslu perspektivní budoucnost. Rozvoj aditivních technologií v těchto oblastech bude v následujícím desetiletí značný a toto odvětví nám bude i nadále pomáhat a překonávat nově stanovené cíle.

## Seznam použité literatury

- [1] MILEWSKI, John O., 2017. Additive Manufacturing Metal, the Art of the Possible. In: John O. MILEWSKI, ed. *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry* [online]. Cham: Springer International Publishing, Springer Series in Materials Science, s. 7–33 [vid. 2020-01-25]. ISBN 978-3-319-58205-4. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-319-58205-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4_2)
- [2] Associated Press News., 2019. Global 3D Printing and Additive Manufacturing in the Aerospace and Defence Market Expected To Hit A CAGR Of 19.5% By 2028. *AP NEWS* [online] [vid. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://apnews.com/Wired%20Release/e26581cbd6e5a4a936f6bfcc098aafcf>
- [3] KOCOVIC, Petar, 2017. *3D printing and its impact on the production of fully functional components: emerging research and opportunities*. Hershey, PA: Engineering Science Reference. Advances in chemical and materials engineering (ACME) book series. ISBN 978-1-5225-2289-8.
- [4] ISO/ASTM 52900:2015. *ISO* [online] [vid. 2020-01-27]. Dostupné z: <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/96/69669.html>
- [5] ZETKOVÁ, Ivana, 2017. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem* [online]. Plzeň. Disertační práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/28412/1/Zetkova.pdf>
- [6] Introduction to Binder Jetting 3D printing. *3D Hubs* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- [7] The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. *3Dnatives* [online]. 10. září 2019 [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [8] Norsk Titanium. *NORSK TITANIUM* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.norsktitanium.com/>



- [9] ScienceDirect, nedatováno. Binder Jetting - an overview | ScienceDirect Topics [online] [vid. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/binder-jetting>
- [10] NAJMON, Joel C., Sajjad RAEISI a Andres TOVAR, 2019. 2 - Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In: Francis FROES a Rodney BOYER, ed. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* [online]. B.m.: Elsevier, s. 7–31 [vid. 2020-01-28]. ISBN 978-0-12-814062-8. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9)
- [11] GASMAN, Lawrence, 2019. 15 - Additive aerospace considered as a business. In: Francis FROES a Rodney BOYER, ed. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* [online]. B.m.: Elsevier, s. 327–340 [vid. 2020-01-28]. ISBN 978-0-12-814062-8. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-12-814062-8.00017-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00017-0)
- [12] GE, nedatováno. Arcam EBM Spectra H. *GE Additive* [online] [vid. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines/arcam-ebm-spectra-h>
- [13] PAGÁČ, Marek, nedatováno. *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz* [online]. [vid. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [14] MOHD YUSUF, Shahir, Samuel CUTLER a Nong GAO, 2019. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals* [online]. 9(12), 1286 [vid. 2020-01-29]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:[10.3390/met9121286](https://doi.org/10.3390/met9121286)
- [15] ScienceDirect, nedatováno. *Selective Laser Sintering, SLS* [online] [vid. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/selective-laser-sintering>
- [16] 3D Hubs., nedatováno. Industrial FDM vs. Desktop FDM. 3D Hubs [online] [vid. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/industrial-fdm-vs-desktop-fdm/>
- [17] TAPPA, Karthik a Udayabhanu JAMMALAMADAKA, 2018. Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques. *Journal of Functional Biomaterials* [online]. 9(1), 17 [vid. 2020-02-25]. ISSN 2079-4983. Dostupné z: doi:[10.3390/jfb9010017](https://doi.org/10.3390/jfb9010017)
- [18] SIMONELLI, Marco, Nesma ABOULKHAIR, Mircea RASA, Mark EAST, Chris TUCK, Ricky WILDMAN, Otto SALOMONS a Richard HAGUE, 2019. Towards digital metal additive manufacturing via high-temperature drop-on-demand jetting. *Additive Manufacturing*

- [online]. 30, 100930 [vid. 2020-02-25]. ISSN 22148604. Dostupné z: [doi:10.1016/j.addma.2019.100930](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100930)
- [19] GONZÁLES, David a Almudena ÁLVAREZ, nedatováno. Additive Manufacturing Feasibility Study and Technology Demonstration [online]. B.m.: EDA. Dostupné z: [https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report\\_v6.pdf](https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf)
- [20] CHUA, Chee Kai, Wai Yee YEONG a Chee How WONG, nedatováno. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing | ScienceDirect [online] [vid. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128134894/standards-quality-control-and-measurement-sciences-in-3d-printing-and-additive-manufacturing>
- [21] LAURENSVAN, Lieshout, 2020. Laminated object manufacturing [online]. [vid. 2020-02-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laminated\\_object\\_manufacturing&oldid=942126223](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laminated_object_manufacturing&oldid=942126223)
- [22] DVOŘÁK, Jan, 2017. Technologické možnosti aditivních technologií [online]. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP\\_Dvorak.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1)
- [23] KONDO, Hironori, 2019. Vat Polymerization: What Are SLA, DLP, and LCD? All3DP [online] [vid. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/vat-polymerization-what-are-sla-dlp-and-lcd/>
- [24] Formlabs., nedatováno. Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now | Formlabs [online] [vid. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/>
- [25] Materialise, nedatováno. STL Editor | STL Repair Software | Materialise Magics [online] [vid. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/software/magics>
- [26] HUANG, Runze, Matthew RIDDLE, Diane GRAZIANO, Joshua WARREN, Sujit DAS, Sachin NIMBALKAR, Joe CRESKO a Eric MASANET. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **135**, 1559–1570 [vid. 2020-03-08]. ISSN 09596526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.109](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109)

- [27] *Additive Manufacturing in Aerospace, Defence & Space* [online]. B.m.: Defence IQ. 2016. Dostupné z: <https://defencesummits.files.wordpress.com/2016/02/additive-manufacturing-in-defence-and-aerospace-analysis-and-trends-20161.pdf>
- [28] WAITE, S., D. LAMOTHE, A. ENACHE a R. TAJES. *EASA CM-S-008* [online]. 4. duben 2017. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/product-certification-consultations/easa-cm-s-008>
- [29] Mechanical and durability testing of aerospace materials. In: *Introduction to Aerospace Materials* [online]. B.m.: Elsevier, 2012 [vid. 2020-03-16], s. 91–127. ISBN 978-1-85573-946-8. Dostupné z: doi:[10.1533/9780857095152.91](https://doi.org/10.1533/9780857095152.91)
- [30] CS-25 / Amendment 24 | Large Aeroplanes. *EASA* [online]. [vid. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-24>
- [31] *European Technical Standard Order* [online]. 21. únor 2018. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-ETSO%20Amendment%2013.pdf>
- [32] 2017 EASA Workshop on Additive Manufacturing | *EASA* [online]. 27. září 2017 [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/events/2017-easa-workshop-additive-manufacturing>
- [33] CS-E / Amendment 5 | Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines — CS-E. *EASA* [online]. [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-e-amendment-5>
- [34] Easy Access Rules for Propellers (CS-P) | initial issue & amendment 1. *EASA* [online]. [vid. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/easy-access-rules-propellers-cs-p>
- [35] *3D printing of aircraft parts* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: [https://www.eos.info/industries\\_markets/aerospace/interior](https://www.eos.info/industries_markets/aerospace/interior)
- [36] Easy Access Rules for Auxiliary Power Units (CS-APU) (Initial issue) | *EASA* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/easy-access-rules-auxiliary-power-units-cs-apu-initial-issue>
- [37] Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification (Regulation (EU) No 748/2012) | *EASA* [online]. prosinec 2019 [vid. 2020-03-29]. Dostupné z:

<https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/easy-access-rules-initial-airworthiness>

- [38] Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Regulation (EU) No 1321/2014) | EASA [online]. [vid. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/easy-access-rules-continuing-airworthiness-regulation-eu-no-0>
- [39] NOLAN, Rob a Davide SHER. 3D PRINTED Aircraft, Spacecraft and Drones [online]. 2017, **2017**, 17. Dostupné z: [https://www.smartechanalysis.com/wp-content/uploads/2017/09/20171114055139AEROSPACE\\_REPORTS\\_SERIES\\_WEBINAR.pdf](https://www.smartechanalysis.com/wp-content/uploads/2017/09/20171114055139AEROSPACE_REPORTS_SERIES_WEBINAR.pdf)
- [40] CHRISTMAS SALE - British Airway Economy Seat 3D model [online]. [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.cgtrader.com/3d-models/aircraft/part/british-airway-economy-seat>
- [41] British Airways World Traveller Economy Class Review. SKYTRAX [online]. [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.airlinequality.com/news/ba-economy-class-review/>
- [42] ABS Acetone Vapor Smoothing: A Simple Guide. All3DP [online]. 1. srpen 2019 [vid. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/abs-smoothing-a-beginners-guide-to-abs-vapor-smoothing/>
- [43] A350-1000. Airbus [online]. [vid. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family/a350-1000.html>
- [44] 10 3D Printing Startups To Watch Out For In 2020. AMFG [online]. 12. únor 2020 [vid. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2020/02/12/10-3d-printing-startups-to-watch-out-for-in-2020/>
- [45] NTOUANOGLOU, Kyriakos, Panos STAVROPOULOS a Dimitris MOURTZIS. 4D Printing Prospects for the Aerospace Industry: a critical review. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **18**, 120–129 [vid. 2020-05-09]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:[10.1016/j.promfg.2018.11.016](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.11.016)
- [46] REZENDE, R.A., V. MIRONOV a J.V.L. DA SILVA. Bioprinting Tissues and Organs. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. B.m.: Elsevier, 2016 [vid. 2020-05-13], s. B9780128035818041000. ISBN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-12-803581-8.04139-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04139-4)